



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA DE MINAS

“ESTUDIO DESCRIPTIVO DE OPTIMIZACIÓN DE LOS AGENTES DE VOLADURA PARA CONTROLAR Y/O MITIGAR LOS GASES TÓXICOS GENERADOS AL SER DETONADOS, CAJAMARCA – PERÚ, 2015”

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO DE MINAS

Autor:

Velásquez Iparraguirre Joe Daniel

Asesor:

M.Cs. Ing. José A. Siveroni Morales

Cajamarca – Perú
2015

APROBACIÓN DE LA TESIS

El (La) asesor(a) y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por el Bachiller **Joe Daniel Velásquez Iparraguirre**, denominada:

**“ESTUDIO DESCRIPTIVO DE OPTIMIZACIÓN DE LOS AGENTES
DE VOLADURA PARA CONTROLAR Y/O MITIGAR LOS GASES
TÓXICOS GENERADOS AL SER DETONADOS, CAJAMARCA –
PERÚ, 2015”**

MCs.Ing. José A. Siveroni Morales
ASESOR

Ing. Víctor E. Álvarez León
**JURADO
PRESIDENTE**

Ing. Roberto Gonzales Yana
JURADO

Ing. Wilder Chuquiruna Chávez
JURADO

DEDICATORIA

A Dios, que aunque antes Yo no había abierto la puerta de mi corazón siempre estuvo cerca, y ahora Él está conmigo dirigiendo mi vida en todo momento.

A mis amados padres Rosa y Víctor, que perseveraron en Mí pese a toda adversidad, a mis ganas de superación personal y profesional.

Y a la mejor persona de mi vida, mi bella novia e hija Patty y Rivka, que cambiaron mi mundo motivándome a ser mejor día a día.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Privada del Norte y a mis profesores, que con su generoso deseo de enseñar alimentaron mi aprendizaje durante todos mis años de estudio.

A mi excelente profesor y buen amigo PhD. Carlos Agreda Turriate, que desde conocerlo inspiró mi camino y deseo profesional de superación constante con su ejemplo de vida.

A mi asesor MCs Ing. José Siveroni Morales, que con su vasto conocimiento siempre me guio hacia lo correcto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DE LA TESIS	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. Realidad problemática	17
1.2. Formulación del problema	18
1.3. Justificación	18
1.3.1. Justificación teórica	18
1.3.2. Justificación aplicativa o práctica	18
1.3.3. Justificación valorativa	18
1.3.4. Justificación académica	18
1.4. Limitaciones	18
1.5. Objetivos	19
1.5.1. <i>Objetivo General</i>	19
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	19
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	20
2.1. Antecedentes	20
2.2. Bases teóricas	22
I: Métodos de fragmentación del macizo rocoso	22
1.1. Clasificación general	23
1.2. Procesos de fragmentación del macizo rocoso	24
1.2.1. R. Frank Chiappetta	25
1.2.2. La Escuela Americana	25
1.2.2.1. Primera fase: Fracturas radiales (Brisance)	25
1.2.2.2. Segunda fase: Empuje hacia adelante (Heave)	27
1.2.2.3. Tercera fase: Fragmentación	29
II: Agentes De Voladura	30
2.1. Definición	30

2.2. Clasificación general de las mezclas explosivas comerciales	30
2.2.1. Altos explosivos.....	31
2.2.2. Bajos explosivos.....	31
2.2.3. Agentes de voladura.....	32
2.3. Características y limitaciones del uso de los agentes de voladura	32
2.3.1. Características ambientales.....	32
2.3.1.1. Flamabilidad.....	33
2.3.1.2. Resistencia al agua	33
2.3.1.3. Resistencia a la temperatura.....	33
2.3.1.4. Sensibilidad.....	34
2.3.1.5. Vapores.....	35
2.3.2. Características de desempeño.....	35
2.3.2.1. Cohesividad.....	35
2.3.2.2. Densidad	36
2.3.2.3. Potencia	36
2.3.2.4. Presión de detonación	37
2.3.2.5. Sensitividad.....	37
2.3.2.6. Velocidad de detonación.....	38
2.4. Accesorios de voladura	39
2.4.1. Clasificación general.....	40
2.4.2. Accesorios de voladura no eléctricos	41
2.4.2.1. Mecha o grúa de seguridad	41
2.4.2.2. Fulminante común.....	41
2.4.2.3. Mecha rápida	42
2.4.3. Cordón detonante.....	42
2.4.4. Accesorios de voladura eléctricos.....	43
2.4.4.1. Detonador eléctrico	43
2.4.5. Tubo de choque.....	44
III: Los impactos ambientales producidos por la voladura de rocas.....	45
3.1. Definición.....	46
3.2. Identificación de los aspectos ambientales	47
3.2.1. Gases tóxicos.....	47
3.2.2. Presión de aire	49
3.2.3. Ruido	50
3.2.4. Polvo.....	51
3.2.5. Vibraciones del macizo rocoso y normativas internacionales	52
3.2.5.1. Alemania: DIN 4150 – Deutsches Institut für Normung.....	55
3.2.5.2. Escocia: PAN 50 Planning Advice Notes	57

3.2.5.3.	EE. UU: OSM 817.67	59
3.2.5.4.	España: UNE 22-381-93.....	60
3.2.5.5.	Suiza: SN 640 315	61
3.2.6.	Lanzamientos de fragmentos de roca	62
3.2.7.	Subsidencia.....	64
IV. Principales causas y gases que se generan durante la voladura de rocas.....		67
4.1.	Gases tóxicos producidos por la voladura de rocas	71
4.2.	Definición.....	71
4.3.	Clasificación general de los gases tóxicos	72
4.3.1.	Dióxido de carbono (CO ₂).....	73
4.3.2.	Nitrógeno	75
4.3.3.	Vapor de agua.....	75
4.3.4.	Monóxido de carbono (CO)	76
4.3.5.	Óxidos nitrosos (NO ₂).....	78
4.3.6.	Óxidos nítricos (NO).....	79
4.4.	Clases de gases nocivos por el instituto de fabricantes de explosivos	79
V: Formulación de los agentes de voladura		81
5.1.	Definición.....	82
5.1.1.	Agentes de voladura.....	82
5.2.	Especificaciones técnicas que deben reunir los componentes de un agente de voladura para ser óptimos.....	82
5.2.1.	Especificaciones técnicas del nitrato de amonio (NO ₃ NH ₄).....	83
5.2.2.	Especificaciones técnicas del aluminio granulado	84
5.2.3.	Especificaciones técnicas del petróleo diésel N° 2 (FO).....	85
2.3.	Definición de términos básicos.....	85
CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS.....		86
3.1.	Formulación de la hipótesis.....	86
3.2.	Operacionalización de variables.....	86
3.2.1.	Variable independiente	86
3.2.2.	Variable dependiente.....	86
3.2.3.	Variable interviniente	87
CAPÍTULO 4. MATERIAL Y MÉTODOS.....		91
4.1.	Tipo de diseño de investigación.....	91
4.2.	Material.....	91
4.2.1.	<i>Población</i>	91
4.2.2.	<i>Muestra</i>	91
4.2.3.	<i>Unidad de estudio</i>	92
4.3.	Métodos.....	92
4.3.1.	<i>Técnicas de recolección de datos y análisis de datos</i>	92

4.3.1.1. Equipos para monitoreo de gases tóxicos producidos por la detonación de agentes de voladura.....	93
4.3.1.1.1. Detección de oxígeno (O).....	94
4.3.1.1.1.1. Lámpara de carburo y técnica del fósforo.....	94
4.3.1.1.1.2. Indicador Fyrite de oxígeno.....	95
4.3.1.1.1.3. Operación del equipo.....	96
4.3.1.1.1.4. Precauciones generales.....	97
4.3.1.1.2. Detección de monóxido de carbono (CO).....	98
4.3.1.1.2.1. Monitor digital Gas Alert QUATTRO para CO, NO, NO ₂ , H ₂ S, O ₂ y LEL, etc.....	98
4.3.1.1.3. Detección de anhídrido carbónico (CO ₂).....	99
4.3.1.1.3.1. Indicador Fyrite de anhídrido carbónico.....	100
4.3.1.1.3.2. Tratamiento en caso de intoxicación.....	100
4.3.2. Procedimientos.....	101
4.3.2.1. Optimización de agentes de voladura.....	102
4.3.2.1.1 Balance de oxígeno (OB ≈ 0).....	102
4.3.2.1.2 Calor de explosión (Q ₃ ≈ máximo).....	104
4.3.2.1.3 Costo mínimo (US\$/Kg ≈ mínimo).....	104
4.3.2.1.4 Generación de gases nocivos (fumes ≈ mínimo).....	105
4.3.3. Determinación del balance de oxígeno y calor de explosión de los agentes de voladura.....	105
4.3.3.1. Agente de voladura AN/FO: NO ₃ NH ₄ + CH ₂	105
4.3.3.2. Agente de voladura AL/AN/FO: NO ₃ NH ₄ + CH ₂ + Al.....	110
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	117
5.1. Gases producidos según el porcentaje de Diesel.....	117
5.2. Calor de explosión máximo liberado en un balance óptimo del ANFO.....	118
5.3. Incremento de energía liberada al agregar aluminio al ANFO.....	119
5.4. Curvas límite en velocidad de detonación para el ANFO.....	120
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN.....	121
CONCLUSIONES.....	122
RECOMENDACIONES.....	124
REFERENCIAS.....	125
ANEXOS.....	127

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla N° 2.1. Resistencia al agua	33
Tabla N° 2.2. Resistencia a la temperatura	34
Tabla N° 2.3. Sensitividad.....	34
Tabla N° 2.4. Vapores.....	35
Tabla N° 2.5. Densidad.....	36
Tabla N° 2.6. Presión de detonación.....	37
Tabla N° 2.7. Sensitividad.....	38
Tabla N° 2.8. Muestra la velocidad de detonación	38
Tabla N° 3.1. Normatividad internacional	54
Tabla N° 3.2. Resumen de la norma DIN 4150	55
Tabla N° 3.3. Resumen de la velocidad de partícula de la norma DIN 4150.	56
Tabla N° 3.4. Resumen de la norma DIN 4150.	57
Tabla N° 3.4.1. Valores Representativos.	57
Tabla N° 3.5. Resumen de la norma PAN 50.....	58
Tabla N° 3.5.1. Valores Representativos	59
Tabla N° 3.6. Resumen de la norma OSM 817.67	59
Tabla N° 3.7. Resumen de la norma UNE 22-381-93.....	61
Tabla N° 3.7.1. Valores Representativos.	61
Tabla N° 3.8. Resumen de la norma SN 640 315	62
Tabla N° 4.1. Efectos producidos por inhalación de CO ₂	74
Tabla N° 4.2. Efectos producidos por inhalación de CO.....	77
Tabla N° 4.3. Efectos de % de COHb en el cuerpo	78
Tabla N° 4.4. Clases de gases nocivos según su concentración.....	79
Tabla N° 5.1. Especificaciones técnicas del Nitrato de Amonio.....	83
Tabla N° 5.1.1. Tamaño de partículas.....	84
Tabla N° 5.3. Especificaciones técnicas del Aluminio Granulado	84
Tabla N° 5.3.1. Tamaño de partículas.....	84
Tabla N° 5.4. Especificaciones técnicas del Petróleo Diesel N°2.	85

CAPÍTULO 3

Tabla N° 3.1. Matriz de operacionalización de variables.	87
Tabla N° 3.2. Matriz de operacionalización de variables.	88
Tabla N° 3.3. Matriz de operacionalización de variables.	88
Tabla N° 3.4. Matriz de operacionalización de variables.	89
Tabla N° 3.5. Matriz de operacionalización de variables.	90

CAPÍTULO 4

Tabla N° 4.1. Ecuación del ANFO y sus productos	105
Tabla N° 4.2. Ecuación balanceada del ANFO.....	105
Tabla N° 4.3. Peso molecular de los ingredientes del AN/FO.	106
Tabla N° 4.4. Porcentaje de los ingredientes del AN/FO.....	106
Tabla N° 4.5. Átomos-gramos de los ingredientes del AN.....	107
Tabla N° 4.6. Átomos-gramos de los ingredientes del FO.....	107
Tabla N° 4.7. Átomos-gramos del AN/FO.	108
Tabla N° 4.8. Balance de oxígeno (OB) del AN/FO.....	108
Tabla N° 4.9. Calor de explosión del AN/FO.	109
Tabla N° 4.10. Calor de explosión del AN/FO (Kcal/mol).	109
Tabla N° 4.11. Conversión de Gr/mol a Kg/mol.....	110
Tabla N° 4.12. Conversión de Kcal/mol a Kcal/Kg.	110
Tabla N° 4.13. Ecuación del ALANFO y sus productos.....	110
Tabla N° 4.14. Ecuación balanceada del ALANFO.	110
Tabla N° 4.15. Peso molecular de los ingredientes del AL/AN/FO.	111
Tabla N° 4.16. Porcentaje de los ingredientes del AL/AN/FO.....	111
Tabla N° 4.17. Átomos-gramos de los ingredientes del AN.....	112
Tabla N° 4.18. Átomos-gramos de los ingredientes del FO.....	112
Tabla N° 4.19. Átomos-gramos de los ingredientes del AL.	113
Tabla N° 4.20. Átomos-gramos del AL/AN/FO.	113
Tabla N° 4.21. Balance de oxígeno (OB) del AL/AN/FO.....	114
Tabla N° 4.22. Calor de explosión del AL/AN/FO.....	115
Tabla N° 4.23. Calor de explosión del AL/AN/FO (Kcal/mol).....	115
Tabla N° 4.24. Conversión de Gr/mol a Kg/mol.....	116
Tabla N° 4.25. Conversión de Kcal/mol a Kcal/Kg.	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.1. Tunnel Boring Machine	24
Figura N° 1.2. Avance de la ciencia de la voladura de rocas.....	25
Figura N° 1.3. Primera fase, donde se producen las primeras fracturas radiales.....	26
Figura N° 1.4. Segunda fase, por la presión de los gases el macizo rocoso se desplaza hacia adelante.	28
Figura N° 1.5. Resumen de las fases, y última fase donde se produce la fragmentación total del macizo rocoso.....	29
Figura N° 2.1. Clasificación general de las mezclas explosivas comerciales	30
Figura N° 2.2. Alto explosivo y su iniciador	31
Figura N° 2.3. Bajo explosivo que se usa como ingrediente en la mecha de seguridad denominada pólvora negra	31
Figura N° 2.4. Agente de voladura, como el AN/FO	32
Figura N° 2.5. Clasificación general de los accesorios de voladura	40
Figura N° 2.6. Guía de seguridad.....	41
Figura N° 2.7. Fulminante común.....	41
Figura N° 2.8. Mecha rápida.	42
Figura N° 2.9. Cordón detonante.	42
Figura N° 2.10. Detonador eléctrico.	43
Figura N° 2.11. Tubo de choque.	44
Figura N° 3.1. Impactos ambientales producidos por la minería informal.	45
Figura N° 3.2. Muerte de un ingeniero por gases nocivos, en una mina del sur del Perú.....	48
Figura N° 3.3. Efectos del CO en el organismo humano, a concentración de 0.1 %.....	49
Figura N° 3.4. Efectos a las estructuras de la voladura de rocas.	49
Figura N° 3.5. Efectos de la voladura de rocas a la audición de cualquier trabajador.....	50
Figura N° 3.6. Disparo produciendo polvo al momento de la detonación.	52
Figura N° 3.7. Efectos de las vibraciones a las estructuras cercanas a una zona de influencia de un disparo primario.	54
Figura N° 3.8. Excesivo lanzamientos de fragmentos de rocas.....	63
Figura N° 3.9. Longitudes de Taco.....	64
Figura N° 3.10. Subsistencia inducida por la voladura de rocas.....	65
Figura N° 3.11. Efecto de la subsidencia en el suelo (Mina de Potasio 08/14 - Rusia).	66

Figura N° 4.1. Generación de gases tóxicos al detonar una mezcla explosiva comercial.....	68
Figura N° 4.2. Accidente fatal por asfixia de los gases tóxicos.....	69
Figura N° 4.3. Operación minera subterránea y superficial	70
Figura N° 4.4. Trabajadores accidentados en una mina subterránea	71
Figura N° 4.5. Operaciones mineras subterráneas con sus respectivas mangas de ventilación.....	72
Figura N° 4.6. Operación minera unitaria de voladura de rocas en un tajo abierto.	73
Figura N° 4.7. Diagrama de fases del agua	75
Figura N° 4.8. Trabajador gaseado en una mina subterránea.....	76
Figura N° 5.1. Fragmentación como resultado de una voladura de rocas.	81
Figura N° 5.2. Agente de voladura y los boosters respectivos.	82
CAPÍTULO 4	
Figura N° 4.1. Lámpara de Carbuo y técnica del fósforo para detectar la falta de oxígeno en una mina subterránea.....	94
Figura N° 4.2. Equipo Fyrite.....	95
Figura N° 4.3. Monitor digital Multigas QUATTRO para CO, NO, NO ₂ , H ₂ S, O ₂ y LEL, etc.	99
Figura N° 4.4. Presencia de gases en una mina subterránea y la forma como auxiliar a la persona gaseada.	101
Figura N° 4.5. Presencia de oxígeno en la MEC.	104

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Grafico N° 5.1. Gases Produced Vs. Percentage of Fuel Oil (FO).....	117
Gráfico N° 5.2. Efectos del contenido de Diésel en la energía liberada por el explosivo.....	118
Grafico N° 5.3. Incremento de energía liberada al agregar aluminio en el ANFO y formar ALANFO	119
Gráfico N° 5.4. Velocity of Detonations Vs. Percentage of F.O in AN/FO	120

RESUMEN

Se realizó un estudio descriptivo de optimización de los agentes de voladura para controlar y/o mitigar los gases tóxicos generados al ser detonados. Se describieron puntualmente los agentes de voladura y los gases tóxicos no deseados generados al detonar.

En el presente trabajo de investigación se han analizado algunos factores que generan los gases tóxicos, y se ha usado el modelo matemático postulado por los Doctores Melvin Cook y Alan Bauer para determinar el balance de oxígeno y el calor de explosión óptimo de los agentes de voladura, logrando teóricamente el control y/o mitigación de dichos gases tóxicos, y la eficacia y eficiencia en la voladura de rocas.

El desarrollo de los temas está contenido en 6 capítulos y lo correspondiente a resultados de optimización en balance de oxígeno, calor de explosión y productos gaseosos deseados. La importancia del estudio plasmado en ésta investigación, se fundamenta en el hecho de llegar a un punto de equilibrio, en el que el uso de agentes de voladura para minería, sea una operación con el menor riesgo posible para los trabajadores en su práctica, e impacte mínimamente el ambiente circundante.

ABSTRACT

A descriptive study of optimization of blasting agents was conducted to monitor and / or mitigate the toxic gases generated to be detonated. Blowing agents are described and promptly unwanted toxic gases generated by detonating.

In this research work they have been analyzed some factors that generate toxic gases, and has been used mathematical model postulated by Melvin Cook and Alan Bauer doctors to determine the oxygen balance and optimum heat blast blasting agents theoretically gaining control and / or mitigation of such toxic gases, and the effectiveness and efficiency in rock blasting.

The development of the topics contained in 6 chapters and corresponding optimization results in oxygen balance, heat of explosion and gaseous products desired. The importance of studying captured in this investigation, is based on the fact reach a point of equilibrium, in which the use of mining blasting agents, is an operation with the least possible risk to workers in their practice, and minimally impact the surrounding environment.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la mayoría de los cuerpos mineralizados son explotados desde la corteza terrestre usando mezclas explosivas comerciales y conjuntamente accesorios de voladura de rocas, ya que es el método más común para extraer minerales de la corteza terrestre y es económico y eficiente si se los utiliza y formula correctamente.

Estos, al detonarse producen una reacción físico-química, que muchas veces emanan gases tóxicos si estas mezclas explosivas comerciales no son balanceadas en oxígeno.

Una mezcla explosiva comercial está compuesta por ingredientes los cuales unos son combustibles y otros oxidantes; que debidamente cargados dentro de los taladros e iniciados dan lugar a una reacción muy rápida y si estas no están debidamente formulados producen gases tóxicos, que en minería superficial se disipan ligeramente, pero en minería subterránea ocasionan un problema si no hay una ventilación adecuada.

En esta última, una de las causas de accidentes es la asfixia o envenenamiento por los gases, que al ser inhalados por el trabajador provocan el efecto de intoxicación denominado “gaseado”; efecto que puede ser mortal.

1.1. Realidad problemática

Las investigaciones actuales se dirigen a un nuevo estudio de los conceptos a nivel físico-químico y balance de materia-energía adecuados para la mejora en los resultados con respecto a la generación de gases tóxicos producto de detonar agentes de voladura lo que genera consecuencias negativas para la industria minera, en tema de incidentes, accidentes y hasta la muerte de los trabajadores, además de pérdidas económicas al incrementar costos operacionales debido a una fragmentación deficiente ya que la formación de dichos gases disminuye la energía liberada en la explosión. Aunque se llevan varias décadas investigando las formulaciones adecuadas de los agentes de voladura para evitar la generación de gases tóxicos no deseados, actualmente en el campo práctico es un tema mucho más complejo.

La presente investigación, se enfoca en la operación minera de voladura de rocas, desde la descripción de agentes y accesorios de voladura, equipos para monitoreo de gases, los gases tóxicos generados, y como optimizar dichos agentes desde su formulación, para mitigar y/o controlar los gases ya mencionados; y aunque las primeras teorías han sido superadas por las investigaciones actuales, aún conservan todo su valor para comprender los fenómenos de las reacciones que suceden al detonar agentes de voladura. En ese sentido, se da pie a estudios posteriores en investigación y desarrollo a la espera de que surja una teoría general plenamente satisfactoria que minimice los costos de producción, los índices de víctimas fatales por intoxicación y los impactos negativos al ambiente.

1.2. Formulación del problema

¿Es posible que al optimizar los agentes de voladura, se pueda controlar y/o mitigar la producción de gases tóxicos no deseados generados al ser detonados?

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación teórica

La presente investigación, tiene la finalidad de contribuir con la ampliación de información de cómo se formulan agentes de voladura, ya que en nuestro país es difícil el acceso a libros sobre investigaciones en este campo debido a la economía y poca bibliografía disponible.

1.3.2. Justificación aplicativa o práctica

La presente investigación tiene la finalidad de optimizar agentes de voladura desde el punto de vista físico y químico, para así, obtener la máxima eficiencia de los mismos y el mínimo impacto negativo.

1.3.3. Justificación valorativa

El desarrollo del presente trabajo tiene por finalidad contribuir a la investigación y desarrollo por parte de la universidad nacional y privada, la industria minera y de explosivos comerciales; para la fabricación de productos que minimicen los impactos negativos como muertes, daños económicos para la empresa y daños al ambiente producidos por los gases tóxicos no deseados generados al detonar agentes de voladura con deficiencias en su formulación,

1.3.4. Justificación académica

Con el presente trabajo de investigación, se busca obtener el título profesional de Ingeniero de Minas.

1.4. Limitaciones

La principal limitación por parte del investigador en el presente trabajo, ha sido la escasa información con respecto a agentes de voladura y monitoreo de gases tóxicos; así mismo, la restricción a operaciones mineras de voladura de rocas. Sin

embargo, la investigación describe como optimizar los agentes de voladura tomados como unidad de estudio.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Describir el modelo matemático de optimización para agentes de voladura, con la finalidad de controlar y/o mitigar los gases tóxicos no deseados generados en su detonación.

1.5.2. Objetivos Específicos

- ✓ Describir los tipos de gases deseados y tóxicos, producidos por los agentes de voladura al detonar.
- ✓ Describir las características de los agentes de voladura sujeto de éste estudio y conjuntamente sus accesorios.
- ✓ Comparar y explicar el funcionamiento de algunos equipos para monitoreo de gases tóxicos.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Los explosivos químicos son materiales que causan las reacciones químicas muy rápidas para liberar productos gaseosos y energía. Estos gases bajo altas presiones liberan fuerzas sobre las paredes del barreno, lo que provoca que la roca se fracture.

Los elementos que forman los explosivos, generalmente se consideran ya sea elementos combustibles o elementos oxidantes. Los explosivos usan el oxígeno como elemento oxidante. El Nitrógeno es un elemento común en los explosivos y se encuentra en forma líquida o sólida, pero una vez que reacciona forma Nitrógeno gaseoso. Algunas veces podemos encontrar explosivos que contengan otros elementos además de los combustibles y los oxidantes, por ejemplo metales en polvo como el Aluminio que se utilizan en algunas fórmulas.

Los elementos básicos o ingredientes que producen trabajo directamente en las voladuras, son aquellos que generan gases cuando reaccionan, tales como: el carbón, el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno.

El uso de explosivos en minería y construcción data de 1627. De 1627 a 1865, el explosivo utilizado era la pólvora negra; este es un explosivo muy diferente a los que se utilizan hoy en día. En 1865 Alfredo Nobel inventó, en Suecia, la dinamita sobre la base de la nitroglicerina. Más tarde, en 1866, inventó las dinamitas gelatinosas. Estos nuevos productos eran más energéticos que la pólvora negra y se utilizaban de diferente manera, ya que no había necesidad de confinar el explosivo para obtener buenos resultados, como en el caso de la pólvora negra. Desde 1867 hasta la mitad de los años 1950, la dinamita se convirtió en el caballo de batalla de la industria de los explosivos.

A mitad de los años 50, apareció en el mercado un nuevo producto llamado ANFO (Ammonium Nitrate - Fuel Oil), nitrato de amonio y diesel. Este producto es mucho

más económico que la dinamita y hoy en día es la base de la industria de explosivos, ya que aproximadamente el 80% del explosivo utilizado es ANFO.

El ANFO, es parte de una extensa gama de explosivos químicos que existen.

J. Konya y Enrique Albarrán (1998) en sus investigaciones mencionan: Cuando el carbón reacciona con el oxígeno, puede formar ya sea, monóxido o bióxido de carbono. Para poder obtener la máxima temperatura de una reacción, deseamos que los elementos se oxiden completamente, en otras palabras, que se forme bióxido de carbono en vez de monóxido de carbono, de no ser así, hay una marcada diferencia en la temperatura generada cuando un átomo de carbono forma monóxido de carbono, contra el caso donde un átomo de carbono forma bióxido de carbono. Para poder liberar el máximo de energía de la reacción explosiva, los elementos deben reaccionar y formar los siguientes productos:

- ✓ El carbono reacciona para formar bióxido de carbono.
- ✓ El hidrógeno reacciona para formar agua.
- ✓ El nitrógeno, sólido o líquido, reacciona para formar nitrógeno gaseoso.

2.2. Bases Teóricas

I. Métodos de fragmentación del macizo rocoso

Desde los albores de la minería para extraer los minerales de la corteza terrestre han sido, es y será una preocupación constante en lograr la fragmentación adecuada de la roca contrastando los costos operacionales que involucra obtener estos resultados. Hace décadas a tras el hombre ha usado una serie de métodos para atacar al macizo rocoso desde el fuego hasta el uso de la físico-química que es lo que mayormente se usa en la actualidad.

Es por ello, que en el mercado minero global todas las compañías mineras enfrentan hoy en día un tema muy recurrente, que es el cómo aumentar la rentabilidad de la empresa mejorando la eficiencia de cada uno de los procesos que forman la cadena de valor.

Un proceso clave y fundamental dentro de esta cadena de valor es sin lugar a dudas el de la fragmentación de la roca a través de las operaciones mineras binomiales de perforación y voladura de rocas. De estas dos operaciones binomiales depende casi en su totalidad la rentabilidad de la empresa minera. Entonces se puede enfatizar que si se obtiene un buen resultado de la voladura de rocas, se reducirán los costos operacionales; pero si es lo contrario todos los costos de los procesos de la cadena de valor se incrementaran.

1.1 Clasificación general

De acuerdo a la historia y a nivel mundial se conoce que los métodos para atacar al macizo rocoso, son los siguientes:

- ✓ Fuego
- ✓ Energía Eléctrica
- ✓ Energía Hidráulica
- ✓ Energía Mecánica
- ✓ Energía Físico-química

En este milenio la industria extractiva minera ha crecido y seguirá creciendo vertiginosamente, es y será la “madre de las industrias” debido al uso de los metales en las diferentes aleaciones y fabricaciones de bienes para uso y servicio de la humanidad.

En otras palabras la población mundial crece cada día más y así mismo consume deprisa, lo cual no sería "en principio" un problema, si no fuera porque los recursos minerales y energéticos son "finitos". Esto puede dar una visión rápida de la importancia de los metales y minerales industriales con respecto al valor de otras actividades económicas tradicionales. Entonces se puede enfatizar que, los aspectos mineros, económicos, y políticos están íntimamente ligados, funcionando como un trinomio.

Entonces, para satisfacer la demanda del mercado por los metales es indispensable el uso de las mezclas explosivas comerciales y los accesorios de voladura para extraer los minerales desde la corteza terrestre, funcionando de esta manera los accesorios de voladura y la mezcla explosivas como un binomio; en la presente tesis se profundizara en los agentes de voladura.

Por otro lado, se debe mencionar que también existe el ataque mecánico al macizo rocoso a través de los equipos denominadas perforadoras y otros equipos que mayormente son usados en obras civiles, tales como las “Tunnel Boring Machine” (TBM), que el uso de estos depende de la caracterización geomecánica del macizo rocoso. (Villena Alegre. C. 2013)

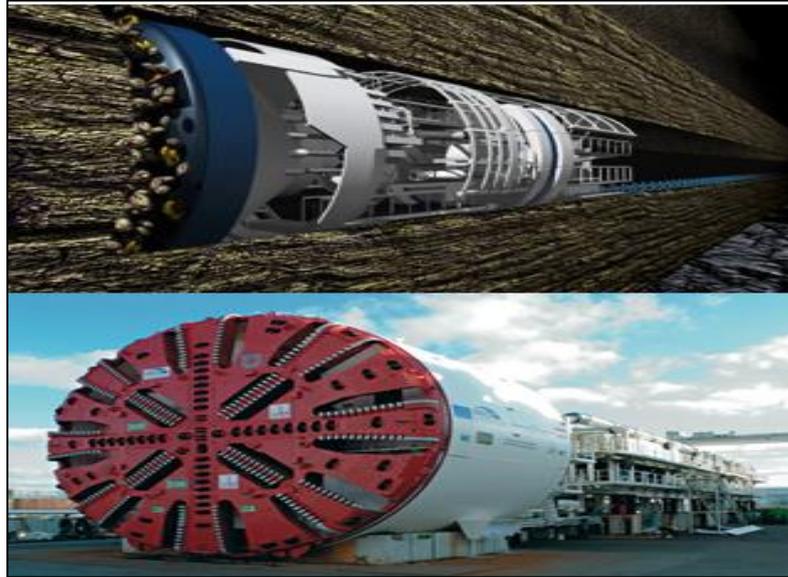


Figura N° 1.1. Tunnel Boring Machine TBM.

Fuente: Obtenido de página Web N°1.

1.2 Procesos de fragmentación del macizo rocoso

Así como avanza la ciencia y la tecnología a pasos agigantados, también desde la década de los años 50 han evolucionado vertiginosamente los conceptos que tratan de explicar el proceso del fracturamiento de rocas; desarrollándose múltiples teorías que tratan de explicar los efectos que causan la detonación de una mezcla explosiva comercial cargada dentro de los taladros. Así por ejemplo ha evolucionado la teoría del proceso de fracturamiento de rocas:

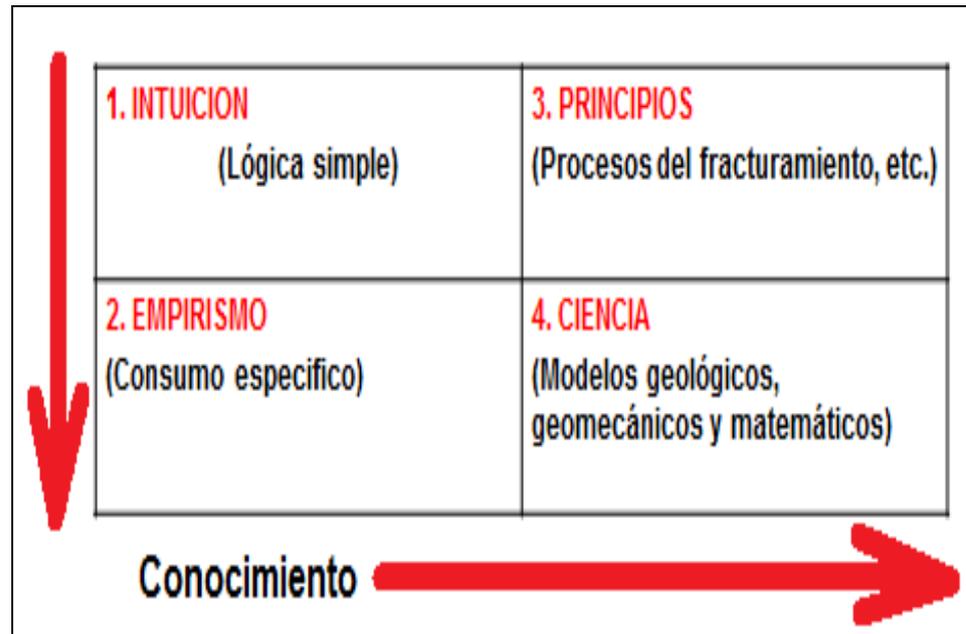


Figura N° 1.2. Avance de la ciencia de la voladura de rocas.

Fuente: ISEE - 2011

1.2.1 R. Frank Chiappetta: Ha propuesto que el proceso de fracturamiento de rocas sea enfocado desde un punto de vista de eventos (Chiappeta, R . F, Bauer, A. & Burchell, S. L 1983 pp 258-309):

- E₁ = Detonación (Detonation)
- E₂ = Propagación de la onda de choque (Shock and/or stress wave propagation)
- E₃ = Expansión por la presión de los gases (Gas pressure expansión)
- E₄ = Movimiento del macizo rocoso (Mass movement), etc.

1.2.2 La Escuela Americana: Divide al proceso de fracturamiento de rocas en tres etapas o fases principales, que son las siguientes:

1.2.2.1 Primera fase: Fracturas radiales (Brisance)

Cuando cualquier mezcla explosiva comercial que se encuentra cargada dentro de un taladro es detonada, se

producen ondas compresivas o también denominadas ondas de choque.

La forma y magnitud de estas ondas compresivas que viajan a altas velocidades cuyo rango esta entre 3,000 – 5,000 m/seg., dependerá de los siguientes parámetros:

- Del tipo de mezcla explosiva comercial,
- Del tipo de roca,
- Del número y posición de los boosters,
- De la altura de carga,
- Del diámetro del taladro y
- La relación de la velocidad de detonación con la velocidad de propagación de las ondas a través del macizo rocoso.

Se puede enfatizar que estas primeras fracturas radiales se producen en las zonas adyacentes a los taladros y el tiempo necesario para esto, esta entre 1 a 2 ms.

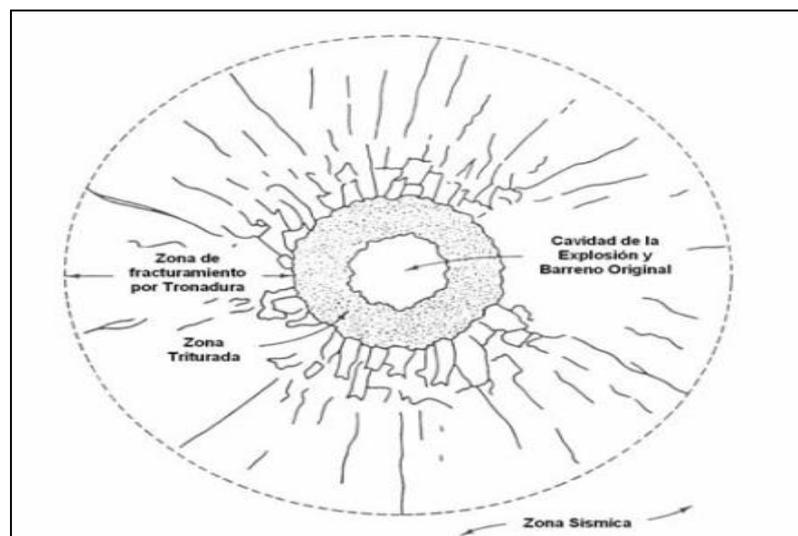


Figura N° 1.3. Primera fase, donde se producen las primeras fracturas radiales.

Fuente: Per Anders Persson - 1994

1.2.2.2 Segunda fase: Empuje hacia adelante (Heave)

Las altas presiones de los gases, hacen que estos produzcan las ondas compresivas las cuales serán refractadas y reflejadas. Las ondas compresivas reflejadas cambiarán de signo (negativo) y se convertirán en ondas tensionales. Esta transformación ocurrirá cuando las ondas compresivas arriben a una cara libre, cuando la masa rocosa cambie de densidad o cuando ellas encuentran fallas geológicas o planos estructurales, etc.

El fracturamiento de la roca comenzará en la cara libre o en cualquier discontinuidad donde las ondas compresivas son reflejadas.

Cuando las ondas compresivas cambian de signo y se convierten en ondas tensionales; ellas regresan de la cara libre o cualquier discontinuidad estructural, hacia el punto de origen de la detonación fracturando el macizo rocoso; porque este falla más fácilmente por efecto de las ondas tensionales que por el de las ondas compresivas.

En general, es muy conocido que la resistencia tensional dinámica de cualquier tipo de roca es menor que su resistencia compresiva dinámica. Las ondas tensionales producirán el empuje hacia adelante (HEAVE) del macizo rocoso en la zona más cercana a la cara libre (Burden).

El empuje hacia adelante (HEAVE) entre otros factores dependerá de lo siguiente:

- Tipo de roca,
- Cantidad y calidad de la mezcla explosiva comercial,

- De las mallas de perforación y voladura a ser usadas en el disparo primario, etc.

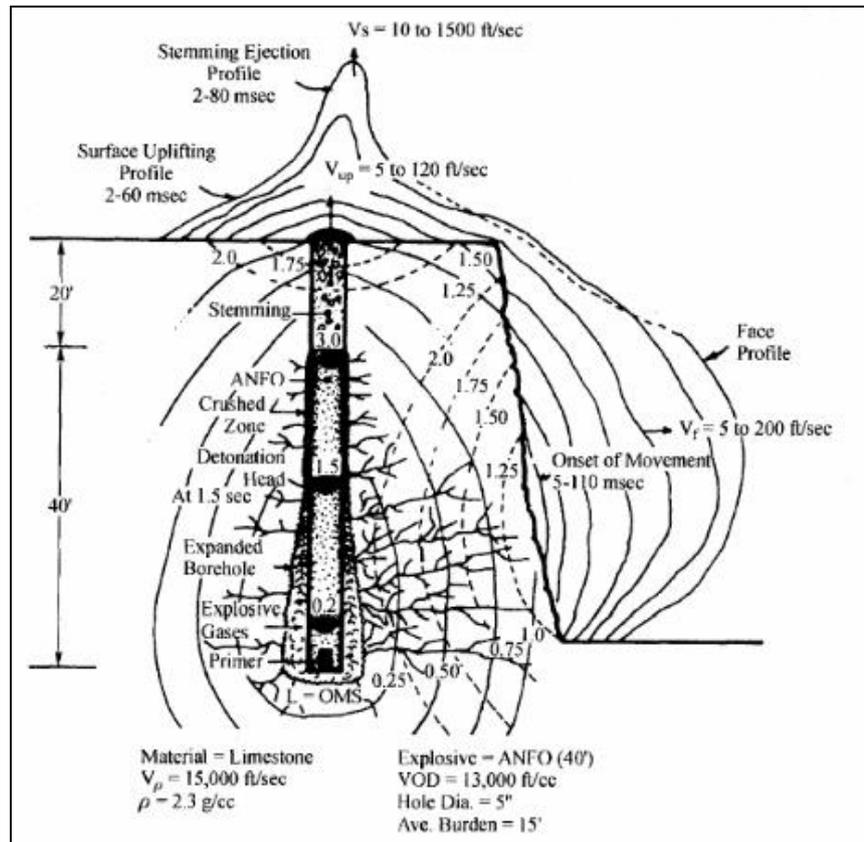


Figura N° 1.4. Segunda fase, por la presión de los gases el macizo rocoso se desplaza hacia adelante

Fuente: Hustruid, W. 1999

1.2.2.3 Tercera fase: Fragmentación

Como su mismo nombre lo indica, en esta etapa se produce la fragmentación total de la roca, es decir se fragmenta toda la labor diseñada, ya sea un banco o un frontón, etc.

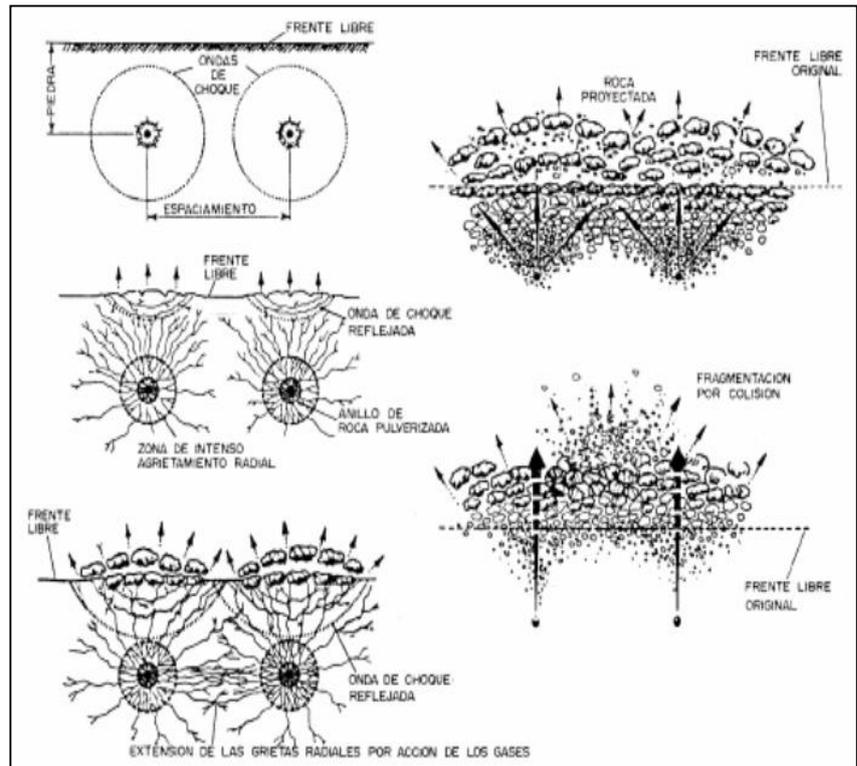


Figura N° 1.5. Resumen de las fases, y última fase donde se produce la fragmentación total del macizo rocoso.

Fuente: DynoConsult Latin América.

II. Agentes de voladura y sus accesorios.

Los agentes de voladura tienen su origen en la década de los cuarenta, tal es así que el AN/FO se descubrió por accidente en el llamado “Texas City Disaster – April 1947”. Por otro lado, el AL/AN/FO se inventó en Marcona Mininig Perú, el S/AN/FO se inventó en Chile y el AN/CO se inventó en Perú. Cabe enfatizar que los agentes de voladura tienen grandes ventajas y desventajas, como toda mezcla explosiva comercial (Llorente, G. E: Estudio de los explosivos industriales, 2002)

2.1 Definición

Los agentes de voladura se podrían definir como aquellos que en su composición no llevan ningún explosivo intrínsecamente explosivo. Otra definición podría ser que los ingredientes de los agentes de voladura no son explosivos, pero que al mezclarse en las cantidades y proporciones técnicas se convierten en mezclas explosivas comerciales.

2.2 Clasificación general de las mezclas explosivas comerciales

De acuerdo a su composición las mezclas explosivas comerciales se clasifican en:



Figura N° 2.1. Clasificación general de las mezclas explosivas comerciales

Fuente: ISEE - 2011

2.2.1 Altos explosivos. Se refieren a las mezclas explosivas comerciales que en su composición si llevan un explosivo intrínsecamente explosivo y que para su iniciación se requiere de un fulminante común. Ejemplo la dinamita.



Figura N° 2.2. Alto explosivo y su iniciador.

Fuente: FAMESA - 2014

2.2.2 Bajos explosivos. Son las mezclas explosivas comerciales que en su composición no llevan ningún explosivo intrínsecamente explosivo y que combustionan o deflagran, pero no detonan. Ejemplo: La pólvora negra (ingrediente principal de la mecha seguridad).

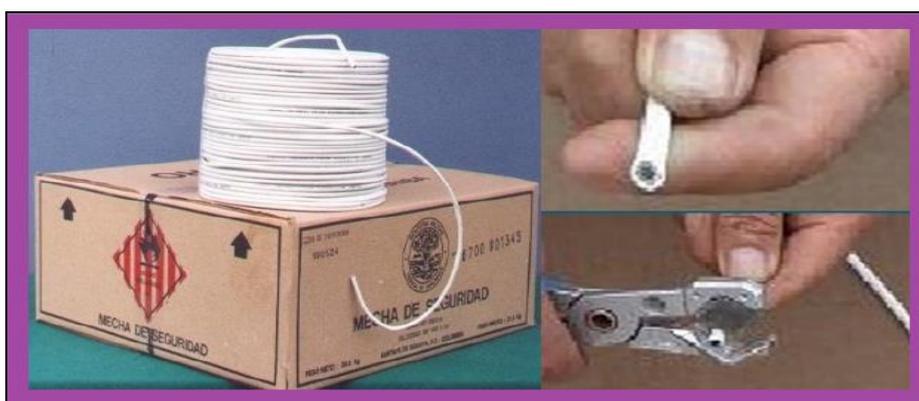


Figura N° 2.3. Bajo explosivo que se usa como ingrediente en la mecha de seguridad denominada pólvora negra.

Fuente: ISEE - 2011

2.2.3 Agentes de voladura. Son las mezclas explosivas comerciales que en su composición no llevan ningún explosivo intrínsecamente explosivo pero que al mezclar sus ingredientes se convierten en un explosivo, así por ejemplo al mezclar el $\text{NO}_3\text{NH}_4 + \text{CH}_2$ obtenemos el AN/FO.

Un agente de voladura no es sensible a los fulminantes comunes y para su iniciación se requiere de un booster que produzca una alta presión de detonación.

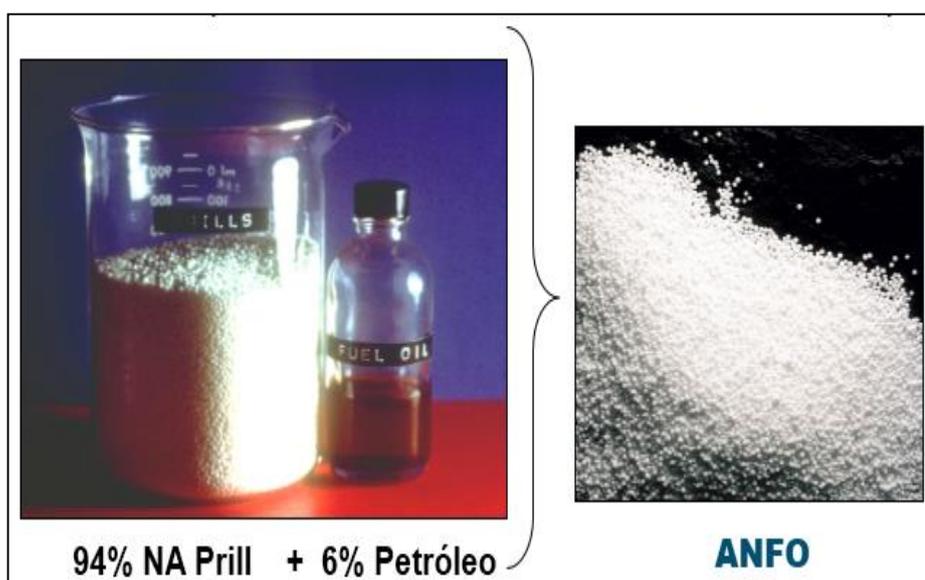


Figura N° 2.4. Agente de voladura, como el AN/FO.

Fuente: Dyno Consult USACH 2003

2.3 Características y limitaciones de los agentes de voladura

2.3.1 Características ambientales. Antes de que el responsable de las voladuras seleccione el explosivo que usará para un trabajo en particular debe determinar qué explosivos son adecuados para las condiciones ambientales y las características de operación que se adapten a la economía del proyecto. Se consideran cinco características en este aspecto (Dr. Calvin J. Konya, Ing. Enrique Albarrán N. Diseño de Voladuras. Primera Edición, 1998, pp 23-37):

2.3.1.1 Flamabilidad. Es la característica que tiene un explosivo para iniciar la reacción con facilidad a partir de una chispa, flama o fuego. Algunos explosivos explotan debido a una chispa mientras que otros pueden ser quemados y no detonan. El problema resulta debido a que se da a los responsables de las voladuras una sensación falsa de seguridad. Algunos creen que todos los explosivos hoy en día son relativamente inflamables. Este sentido falso de seguridad ha provocado la muerte a personas que han sido descuidadas al manejar explosivos y han asumido que la flamabilidad no es problema.

“Todos los compuestos explosivos deben ser tratados cómo altamente flamables”

2.3.1.2 Resistencia al agua. Habilidad de un explosivo de soportar el contacto con el agua sin sufrir deterioro en su desempeño. Los productos explosivos tienen dos tipos de resistencia al agua: interna y externa.

Tabla N° 2.1. Resistencia al agua

Tipo	Resistencia
Dinamita Granulada	Mala a Buena
Dinamita Gelatina	Buena o Excelente
Emulsión Encartuchada	Muy Buena
Emulsión a Granel	Muy Buena
ANFO Colocado	
Neumáticamente	Mala
ANFO Vaciado	Mala
ANFO Encartuchado	Muy Bueno*
ANFO Pesado	Mala o Muy Bueno

Fuente: Diseño de voladuras 1998

2.3.1.3 Resistencia a la temperatura. Los productos explosivos pueden verse afectados en su desempeño si se almacenan bajo temperaturas extremas. Bajo temperaturas de almacenamiento altas, arriba de 32.2 grados Celsius, muchos compuestos se descomponen lentamente o cambian sus propiedades y la vida de

anaquel disminuye. El almacenamiento de agentes explosivos de nitrato de amonio por arriba de los 32.2 grados Celsius puede provocar el ciclado (cambio de cristalización), lo que afectará el desempeño y la seguridad del producto.

Tabla N° 2.2. Resistencia a la Temperatura

Tipo	Entre – 18° C y 38° C
Dinamita Granulada	Buena
Dinamito Gelatina	Bueno
Emulsión Encartuchada	Mala abajo de 4.5°C
Emulsión a Granel	Mala abajo de 4.5°C
AMPO Cargada neumáticamente	Mala arriba de 32.2°C
ANPO Vaciado	Mala arriba de 32.2°C
ANFO Ensacado	Mala arriba de 32.2°C
ANFO Pesado	Mala abajo de 4.5°C.

Fuente: Diseño de voladuras 1998

2.3.1.4 Sensibilidad. Característica que tiene un explosivo para propagar la reacción a todo lo largo de la carga y controla el diámetro mínimo para usos prácticos.

Tabla N° 2.3. Sensitividad

Tipo	Diámetro Crítico		
	<25mm	25mm-50mm	>50mm
Dinamita Granulada	x		
Dinamita Gelatina	x		
Emulsión Encartuchada	x	X	X
Emulsión a Granel		x	X
ANFO colocado neumáticamente	x		
ANFO Vaciado		x	
ANFO Encartuchado		x	X
ANFO Pesado			X

Fuente: Diseño de voladuras 1998

2.3.1.5 Vapores. La clase de vapores de un explosivo se mide de acuerdo a la cantidad de gases tóxicos producidos en el proceso de detonación. El monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno son

los gases principales que se consideran en la catalogación de vapores. Se mide el volumen de gases venenosos liberados por cada 200 gramos de explosivo, si se producen menos de 4530 cm³ de vapores tóxicos entonces el explosivo se cataloga como clase 1. Si se producen entre 4530 cm³ y 9344 cm³ entonces se cataloga clase 2 y entre 9344 cm³ y 18972 cm³ clase 3.

Tabla N° 2.4. Vapores

Tipo	CALIDAD
Dinamita Granulada	Mala a Buena
Dinamita Gelatina	Regular o Muy buena
Emulsión Encartuchada	Buena a Muy buena
ANFO Colocado neumáticamente	Buena*
ANFO Vaciado	Buena*
ANFO Encartuchado	Buena a Muy buena
ANFO Pesado	Buena *

*Puede ser Mala bajo condiciones adversas.

Fuente: Diseño de voladuras 1998

2.3.2 Características de desempeño. En el proceso de selección de un explosivo, las condiciones ambientales pueden eliminar el uso de ciertos tipos de explosivos en un proyecto en particular. Después de considerar las condiciones ambientales, se deben considerar las características de desempeño de los explosivos. Las principales de estas características son: cohesividad, densidad, potencia, presión de detonación, sensibilidad y velocidad de detonación.

2.3.2.1 Cohesividad. La cohesividad se define cómo la habilidad de un explosivo de mantener su forma original. Hay ocasiones en que el explosivo debe mantener su forma original y otras en que debe fluir libremente. Como ejemplo, cuando se hacen voladuras en roca muy fragmentada y agrietada, definitivamente se debe utilizar un explosivo que no fluye hacia las grietas causando con esto que el barreno quede sobrecargado. Por el contrario, en otras aplicaciones,

tales como el cargado a granel, los explosivos deben fluir fácilmente y no atascarse en el barreno ni formar huecos en la columna de explosivo.

2.3.2.2 Densidad. La densidad de un explosivo es importante debido a que los explosivos se compran, almacenan y utilizan sobre la base del peso. La densidad se expresa normalmente como gravedad específica, la cual es la relación de la densidad del explosivo con la densidad del agua. La densidad determina el peso de explosivo que puede cargarse dentro de un diámetro específico de barreno. Basándose en el peso, no hay una diferencia muy marcada en la energía entre diversos explosivos. La diferencia en energía sobre la base de la unidad de peso no es ni siquiera cercana a la diferencia de energía sobre la base de la unidad de volumen.

Tabla N° 2.5. Densidad

Tipo	Densidad (g/cc)
Dinamito Granulada	0.8-1.4
Dinamita Gelatina	1.0-1.7
Emulsión Encartuchada	1.1-1.3
Emulsión a Granel	1.1 - 1.6
ANFO Cargado Neumáticamente	0.8 - 1.0
ANFO Vaciado	0.8-0.9
ANFO Encartuchado	1.1 -1.2
ANFO Pesado	1.1-1.4

Fuente: Diseño de voladuras 1998

2.3.2.3 Potencia. El término potencia se refiere al contenido de energía de un explosivo que a su vez es la medida de la fuerza que puede desarrollar y su habilidad para hacer un trabajo. La potencia ha sido clasificada por varios fabricantes sobre la base de un peso o volumen igual, y comúnmente se les llama potencia en peso y potencia en volumen. La clasificación de potencia es engañosa y no compara, de manera certera, la efectividad de fragmentar la roca con el tipo de

explosivo. En general se puede decir que, la clasificación de potencia, es sólo una herramienta para identificar los resultados finales y asociados con un producto específico.

2.3.2.4 Presión de detonación. La presión de detonación es la que se obtiene de manera casi instantánea como resultado del movimiento de la onda de choque a través del explosivo. Cuando se inicia un explosivo con otro, la presión de choque del explosivo primario se usa para causar la iniciación del explosivo secundario. La presión de detonación puede ser relacionada con la presión de barreno, pero no es necesariamente, una relación lineal.

Tabla N° 2.6. Presión de detonación

Tipo	Presión de Detonación (Kbar)
Dinamito Granulada	20-70
Dinamita Gelatina	70-140
Emulsión Encartuchada	20-100
Emulsión a Granel	20-100
ANFO Vaciado	7-45
ANFO Encartuchado	20-60
ANFO Pesado	20-90

Fuente: Diseño de voladuras 1998

2.3.2.5 Sensitividad. La sensitividad de un explosivo está definida por la cantidad de energía que un explosivo requiere para detonar confiablemente. Esto es conocido en ocasiones como los requerimientos mínimos de cebado. Algunos explosivos requieren de muy poca energía para detonar confiablemente. El fulminante estándar número 8 hará detonar la dinamita y algunos de los hidrogeles y emulsiones sensibles al fulminante. Por otro lado, un fulminante solo no iniciará la reacción del ANFO o hidrogeles a granel.

Tabla N° 2.7. Sensitividad

Tipo	Sensitividad de riesgo	Sensitividad de desempeño
Dinamita Granulada	Moderada a Alta	Excelente
Dinamita Gelatina	Moderada	Excelente
Emulsión Encartuchada	Baja	Bueno o Muy Bueno
Emulsión a Granel	Baja	Buena a Muy Buena
ANFO Cargado Neumáticamente	Baja	Malo a Buena *
ANFO Vaciado	Baja	Malo a Bueno *
ANFO Encartuchado	Baja	Buena a Muy Buena
ANFO Pesado	Baja	Malo a Buena

* Altamente dependiente de las condiciones de campo.

Fuente: Diseño de voladuras 1998

2.3.2.6 Velocidad de detonación. La velocidad de detonación es la velocidad a la cual la reacción se mueve a lo largo de la columna de explosivo. Tiene un rango que va de 1.524 a 7.620 m/s en los productos explosivos comerciales. La velocidad de detonación es una consideración importante para aplicaciones fuera del barreno, tales como el plasteo o la demolición de elementos estructurales.

Tabla N° 2.8. Muestra la Velocidad de Detonación

Tipo	Diámetro		
	32 mm	76mm	229 mm
Dinamita Granulada	2100 - 5800		
Dinamita Gelatina	3600-7600		
Emulsión Encartuchada	4000-4600	4300-4900	
Emulsión a Granel		4300-4900	3700-5800
ANFO Cargado Neumáticamente	2100-3000	3700-4300	4300-4600
ANFO Vaciado	1800-2100	3000-3400	4300-4600
ANFO Encartuchado		3000-3700	4300-4600
ANFO Pesado			3400-5800

Fuente: Diseño de voladuras 1998

2.4 Accesorios de voladura

Son todos los dispositivos requeridos para iniciar y/o retardar mezclas explosivas mediante métodos adecuados y aprobados.

Los sistemas de iniciación transfieren la señal de detonación de taladro a taladro en un tiempo preciso. La selección del sistema de iniciación resulta crítica para el éxito de una voladura. Este sistema no sólo controla la secuencia de disparo de los taladros, sino que también afecta la cantidad de vibración generada por una voladura, el tamaño de la fragmentación producida, el rompimiento trasero y la violencia que puede ocurrir.

Aunque el costo de los sistemas de iniciación es una consideración importante dentro del proceso de selección, debe ser una consideración secundaria, especialmente si el sistema de iniciación más económico causa problemas. La selección de este sistema es una de las consideraciones más importantes dentro de un diseño de voladura.

Como requisito indispensable, estos sistemas de iniciación, deben de tener una alta confiabilidad y seguridad, disminuyendo el riesgo de una posible detonación prematura o no intencional, además de ser adaptables a las características propias de cada operación. (Villagaray M, Anibal. s.f.)

2.4.1 Clasificación general.

Como apreciación general solo se describirán algunos accesorios de voladura, y se puede clasificar y agrupar de la siguiente manera:

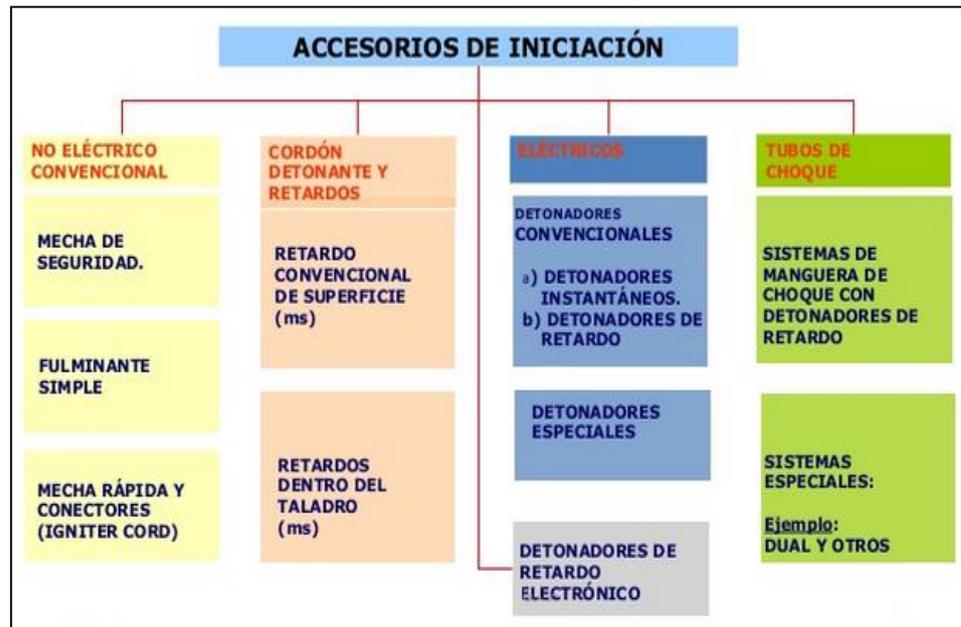


Figura N° 2.5. Clasificación general de los accesorios de voladura
 Fuente: Iniciadores y Dispositivos de Retardo

2.4.2 Accesorios de voladura no eléctricos

2.4.2.1 Mecha o guía de seguridad. También llamada mecha lenta; es un cordón flexible compuesto por un núcleo de pólvora negra recubierto por fibra de algodón, brea y un forro de plástico. El tiempo de combustión es constante y conocido (51 a 52 segundos/pie en promedio). Transmite una llama al fulminante simple para provocar la detonación.

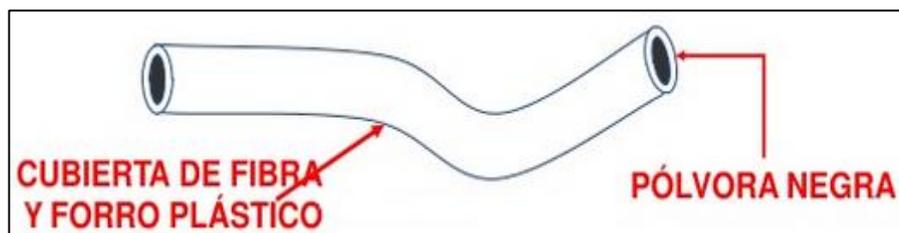


Figura N° 2.6. Guía de seguridad.

Fuente: Iniciadores y Dispositivos de Retardo

2.4.2.2 Fulminante común. Es una cápsula cilíndrica de aluminio que contiene una carga sensible (PET-azida de plomo) que estalla instantáneamente con la llama transmitida por la guía o mecha de pólvora. Con potencias N°6 y N°8; se emplea para iniciar y detonar a la dinamita y otros altos explosivos.

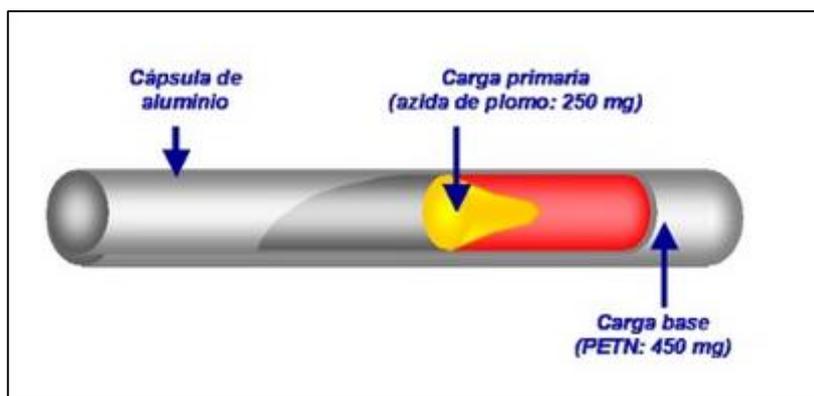


Figura N° 2.7. Fulminante común.

Fuente: Iniciadores y Dispositivos de Retardo

2.4.2.3 Mecha rápida. Cordón delgado y flexible que contiene una masa pirotécnica y dos alambres, que se encuentra cubierto por un material plástico, cubiertos con un forro plástico que se quema con llama abierta a mayor velocidad (entre 10 y 60 segundos/metro). Se emplea para encender las guías de los taladros mediante cápsulas conectoras, en forma secuencial.



Figura N° 2.8. Mecha rápida.

Fuente: Iniciadores y Dispositivos de Retardo

2.4.3 Cordón detonante. Es un cordón flexible y resistente a la tracción, constituido por un núcleo continuo de un alto explosivo (pentrita-PENT), recubierto por capas protectoras textiles y sintéticas, toso lo cual está protegido por un material adecuado para darle la impermeabilidad necesaria y pueda trabajar en las condiciones más severas. Explota prácticamente en forma instantánea en toda su longitud (7000m/s), se usa para transmitir la detonación a todos los taladros de una voladura e iniciarlos.



Figura N° 2.9. Cordón detonante.

Fuente: Iniciadores y Dispositivos de Retardo.

2.4.4 Accesorios de voladura eléctricos

2.4.4.1 Detonador eléctrico. La cápsula y su carga son similares al fulminante, pero se activa mediante una pequeña resistencia al paso de una corriente eléctrica transmitida por alambres conductores. Se fabrica con potencias N°08 y N°12 en dos tipos:

- ✓ **Instantáneo.** Su tiempo de disparo es prácticamente 0 segundos.
- ✓ **De retardo.** Su tiempo de disparo va desde algunas milésimas de segundo (períodos cortos), hasta varios segundos (períodos largos).



Figura N° 2.10. Detonador eléctrico.

Fuente: Iniciadores y Dispositivos de Retardo

2.4.5 Tubos de choque. Sistema de voladura no eléctrico. Tienen alta precisión, confiabilidad y con la ventaja adicional que no hay riesgos a los efectos de la electricidad estática, corrientes inducidas, corrientes erráticas, etc. Usa el cordón detonante como medio de iniciación.

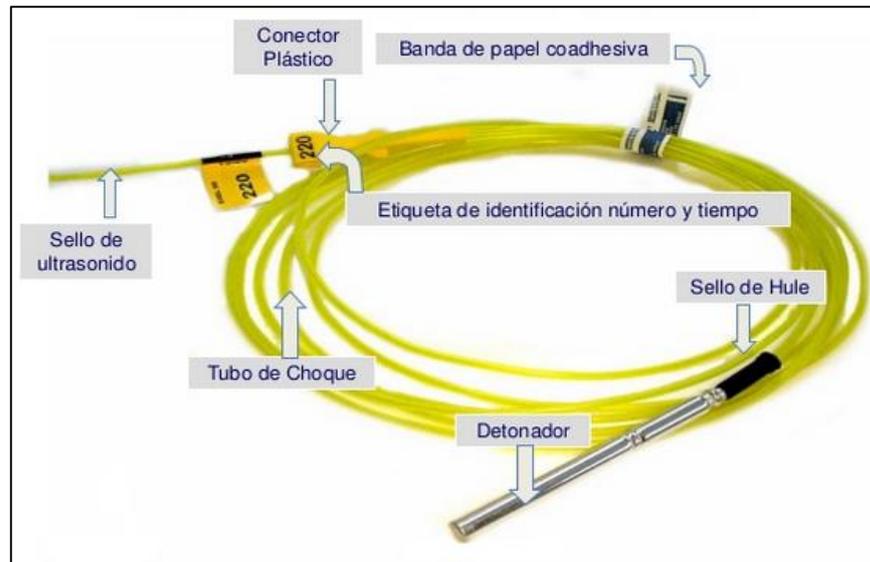


Figura N° 2.11. Tubo de choque.

Fuente: Iniciadores y Dispositivos de Retardo

III. Los impactos ambientales producidos por la voladura de rocas

En décadas pasadas, las empresas mineras frecuentemente al terminar sus operaciones mineras no necesitaban remediar los impactos ambientales ocasionados en los recursos naturales. De esta manera, los costos ambientales no eran económicamente contabilizados, y muchas veces se agotaban los minerales y se dejaba los pasivos ambientales. Actualmente las empresas están cada vez más conscientes, tanto de los impactos ambientales como de sus costos económicos. En este contexto, es interesante comenzar a conectar ambas variables de manera más sistemática, tanto en la investigación como en las estrategias de manejo al cierre de mina, donde ahora si existe un fidecomiso antes de iniciar cualquier operación minera. (Brown, T. E. et al 2008)



Figura N° 3.1. Impactos ambientales producidos por la minería informal.

Fuente: Brown, T. E (2008)

La resolución de conflictos puede involucrar pagos de compensaciones, derechos de paso y eventualmente el costo de rehabilitar zonas explotadas o directamente al abandono de proyectos mineros, tal como es el caso aún no solucionado del proyecto Conga, Cañaris, Tía María, Tambogrande, etc. En algunos países el riesgo político constituye una barrera para la inversión minera, mientras que en otros el riesgo ambiental constituye una barrera tanto o más importante. Actualmente el abrir una nueva mina en EEUU o Canadá es difícil, pero no imposible debido a las condicionantes ambientales impuestas en las últimas décadas, que las empresas legalmente constituidas y responsables si cumplen con las leyes establecidas.

La principal preocupación de este tercer milenio son los impactos ambientales producidos por el hombre. Impactos que tienen consecuencias presentes y en las futuras generaciones, las cuales deben ser tratadas con responsabilidad; para ello, se han creado foros internacionales que son presididos por los presidentes de cada país interesados en tender puentes y crear alternativas para remediar estos impactos ambientales. La minimización de los impactos negativos al ambiente es un factor importante en los estudios de cualquier proyecto que se quiera llevar a cabo. Con esto se puede lograr que los efectos secundarios sean menos negativos. Es posible alcanzar resultados de preservación del ambiente al minimizar el impacto negativo de una acción del hombre.

Por otro lado, la actividad minera produce prosperidad en las zonas donde se lleva a cabo, pero indudablemente tiene un impacto ambiental, que si se puede controlar, minimizar y mitigar usando ciencia y tecnología moderna.

3.1 Definición

Los impactos ambientales, es definido como cualquier cambio en las propiedades físicas, químicas y biológicas causadas por cualquier forma de materia o energía resultante directa o indirectamente de las actividades del hombre.

Entonces, la industria extractiva de la minería no puede ser una excepción. Por tanto, se debe enfatizar que la industria minero-metalúrgica impacta al ambiente, pero aplicando ciencia y tecnología se puede mitigar y muchas veces evitar estos impactos ambientales. Por tanto, en el presente trabajo de investigación, se mencionan los impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas; que es la primera operación minera unitaria con la cual se inicia la explotación minera ya sea subterránea o superficial.

La definición de impactos ambientales inducidos por la voladura de rocas, necesariamente se refiere, a la detonación de cualquier mezcla explosiva comercial usada en la explotación de cualquier cuerpo mineralizado, con la finalidad de extraerlo de la corteza terrestre, cuyo producto es la fragmentación del macizo rocoso; que para lograr se necesita de mezclas

explosivas comerciales que al ser detonadas y no estando algunas veces balanceadas en oxígeno desprenden gases tóxicos.

3.2 Identificación de los aspectos ambientales

3.2.1 Gases tóxicos. Los gases tóxicos que se generan en una voladura de rocas son óxidos nitrosos (NO, N₂O) y/o monóxidos de carbono (CO), y estos son producidos generalmente por la reacción química incompleta de los ingredientes de la mezcla explosiva comercial; y por lo tanto, el balance de oxígeno de dicha mezcla explosiva no tiende a cero.

Es decir $OB \approx 0$; y como consecuencia el calor de explosión (Q_3) de la mezcla explosiva disminuye. Estos gases pueden ser considerados tóxicos a niveles de:

- Óxidos nitrosos: (NO, N₂O) 5ppm
- Monóxido de carbono (CO) 50ppm
- Dióxido de carbono (CO₂) 5000ppm

Las mezclas explosivas comerciales al ser detonadas pueden generar gases no-tóxicos (CO₂, H₂O) y tóxicos (NO, NO₂, CO), factores que aumentan la generación de gases tóxicos siendo estos inapropiados quizás por falta de confinamiento, humedad en la labor minera, composición inapropiada de la mezcla explosiva comercial, tiempos inadecuados y reacción adversa con el macizo rocoso donde se realiza la voladura de rocas (puede que exista minerales sulfurados o carbonatos).

Por otro lado, durante la detonación de un disparo primario para explotar los yacimientos mineralizados se produce la emisión de gases, bien porque estén contenidos en aquellos minerales que se exploten (como es el caso del grisú en el carbón), o porque se produzca una descomposición del mineral que libere esos gases durante el proceso metalúrgico.

Los gases nocivos producidos por la voladura de rocas, en cuanto a su implicancia sobre la seguridad y salud del personal es importante mencionar que estos según su naturaleza pueden ser: inocuos, irritantes, nocivos o tóxicos, y generan los siguientes riesgos:

- Asfixia, por anoxia, al desplazar al aire.
- Intoxicación, envenenamiento y muerte, según sus características letales.



Figura N° 3.2. Muerte de un ingeniero por gases nocivos, en una mina del sur del Perú.

Fuente: Operación de Voladura Subterránea.

Estos efectos están condicionados por el tiempo de exposición de la persona y por el nivel de concentración de los gases en el ambiente de trabajo, que determinan el grado de intoxicación, calificándolo desde leve, notable, severo, grave hasta mortal.



Figura N° 3.3. Efectos del CO en el organismo humano, a
concentración de 0.1 %

Fuente: Operación de Voladura Subterránea.

3.2.2 Presión de aire. Dicha presión es un impulso que viaja a través de la
atmósfera. La mayor cantidad de presión de aire producida por la
voladura de rocas tiene una frecuencia de 20 Hertz.

Muchas veces la presión de aire puede causar la vibración de una
estructura, etc.

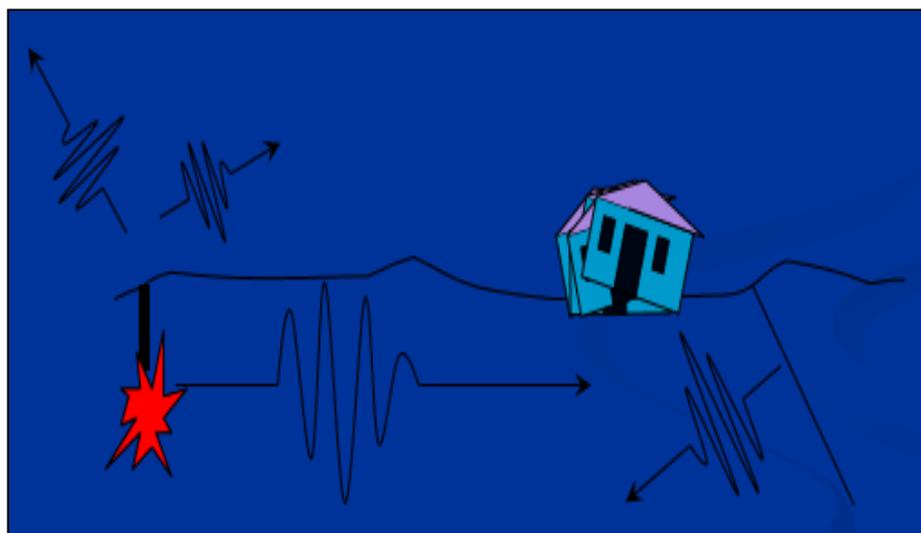


Figura N° 3.4. Efectos a las estructuras de la voladura de rocas

Fuente: EXSA SA.

3.2.3 Ruido. El ruido por la detonación de un disparo primario en minería superficial tiene niveles superiores al de una voladura subterránea, es por ello de suma importancia usar los dispositivos de protección auditiva son indispensables a partir de ciertos niveles de intensidad acústica.

Por tanto, el ruido producido por la voladura de rocas afecta más a los propios trabajadores, ya que la lejanía de las operaciones mineras con respecto a las comunidades aledañas y a los pueblos, hace que desde éstos los ruidos sean imperceptibles o que lleguen muy amortiguados por la distancia.

Al respecto se debe mencionar que el Consejo Nacional del Ambiente se encuentra desarrollando una normativa asociada al tema de ruido, la cual está en la etapa de revisión. En ausencia de una normativa oficial del Perú. En la actualidad se están utilizando estándares internacionales para evaluar los niveles de ruido proyectados y observados. Las normas internacionales se basan en los procedimientos establecidos en la norma ISO 1996: “Description and Measurement of Environmental Noise”.

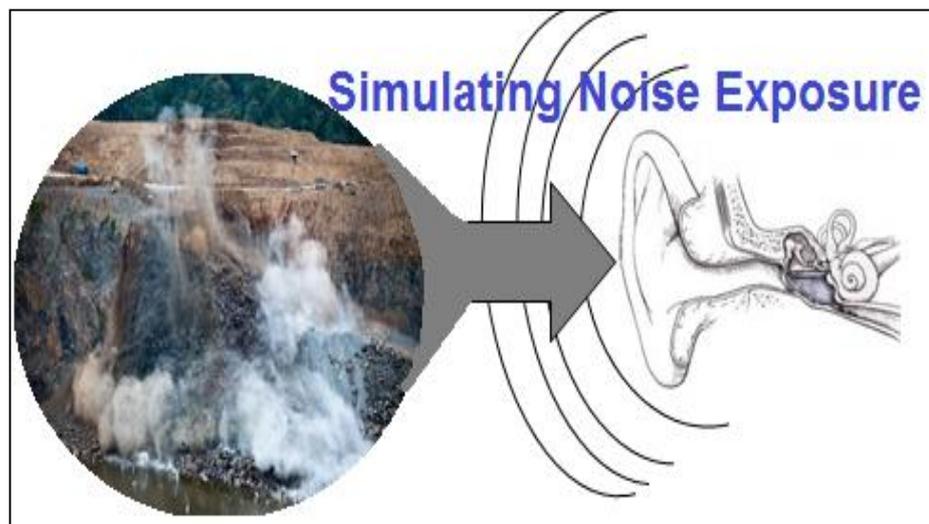


Figura N° 3.5. Efectos de la voladura de rocas a la audición de cualquier trabajador.

Fuente: Elaborado por el investigador.

3.2.4 Polvo. Una gran cantidad de polvo puede ser producido cuando en un disparo primario no se ha usado los retardos adecuadamente.

El control de polvo debe ser importante en cualquier mina en la cual se genere polvo silíceo puesto que este puede producir silicosis y enfermedades pulmonares asociadas. El polvo debe ser mitigado en su mínima expresión en las operaciones mineras para proteger a los propios mineros y a los habitantes aledaños a la unidad minera.

Respecto a la salud tanto humana y de la flora y fauna las características del polvo producido por la voladura de rocas que afectan a ésta son fundamentalmente la composición y granulometría.

La composición afecta porque determinados minerales contienen metales que a su vez pueden tener efectos tóxicos. Por otro lado, la granulometría es muy importante, porque las partículas de polvo de tamaño inferior a 10 micras (las denominadas PM10) entran en el sistema respiratorio alcanzando los pulmones, donde pueden quedar acumuladas y generar graves daños al sistema respiratorio.

Las partículas menores de 2.5 micras (denominadas PM2.5) son aún más peligrosas, ya que se mantienen en suspensión en el aire, lo que permite que se desplacen a largas distancias. El polvo emitido en la industria minera tanto en minería subterránea como superficial tiene su origen en la fragmentación de la roca producido por la voladura; respecto a la minería subterránea, se emitirá a la atmósfera a partir de uno o varios puntos definidos como en las chimeneas de ventilación y los pozos de circulación de aire. Si procede de explotaciones a cielo abierto, provendrá de todo un frente de explotación, más o menos extenso.

En cualquier caso, es prácticamente imposible evitar su emisión, pero si se puede controlar. Solo en la minería subterránea podría evitarse su salida, mediante filtros en los puntos de salida. Desafortunadamente tales filtros tienden a ser evitados para favorecer la rapidez de la limpieza del polvo generado en el interior de la mina

durante la voladura. La composición de este polvo será la misma que la de la roca fragmentada, o también se produce en el carguío y acarreo del material. Respecto al carguío y acarreo puede ser más sencillo su control, simplemente mediante el regado de los frentes de carga durante el proceso.



Figura N° 3.6. Disparo produciendo polvo al momento de la detonación.

Fuente: Curso básico de explosivos. ORICA

3.2.5 Vibraciones del macizo rocoso y normativas internacionales

La minería es un ente multiplicador por ser la industria madre de todas las industrias, por su complejidad y fuente de trabajo directo e indirecto, que donde se desarrolla un proyecto minero trae consigo beneficios directos para las comunidades aledañas (colegios, pistas, postas médicas, luz, agua, etc.).

Sin embargo, esta industria extractiva si no se trabaja con ciencia y tecnología moderna también trae consigo los impactos ambientales. Hace muchas décadas atrás no existía el fondo de fideicomiso para el cierre de mina o algo parecido para la remediación ambiental, pero en la actualidad se puede afirmar que la industria minera legalmente

constituida y con todas las formalidades es sostenible, limpia y responsable con los pasivos ambientales.

Es por lo cual, que causa mucha extrañeza que el Perú siendo un país inminentemente mineralizado, hasta la fecha las instituciones responsables no hayan formado un comité especializado para normalizar estos impactos negativos, tal como lo tienen los países desarrollados y otros como por ejemplo el único país Latinoamericano Brasil.

De manera, que el Perú siempre recurrirá a las normas internacionales para tomar como referencias los límites permisibles en cuanto a vibraciones, es así que existen muchas demandas judicializadas por este tópico, porque la voladura de rocas, produce vibraciones y otros impactos ambientales. Sin voladura de rocas no se podría extraer eficientemente los minerales ubicados dentro de la corteza terrestre.

Cabe enfatizar que el D.S 055-2010/EM, señala el capítulo VI Explosivos desde el artículo 243 al 269, pero sería preguntarse dónde, cuándo y cuantas las pruebas in situ se hicieron, como por ejemplo el comportamiento de los gases de los agentes de voladura en minería subterránea, así como en minería superficial.

Es por eso se tiene que reflexionar que la universidad y todos los involucrados en esta industria minera, se debería formar un comité para regular y normalizar todo lo concerniente a los impactos negativos inducidos por la voladura de rocas, las caracterizaciones geomecánicas, etc.

Este impacto negativo de la voladura de rocas, se puede mitigar y/o evitar usando los modelos matemáticos desarrollados por los investigadores inmersos en esta materia. Las vibraciones se pueden monitorear con los equipos (geófono y sismógrafo), colocándolos en puntos estratégicos.

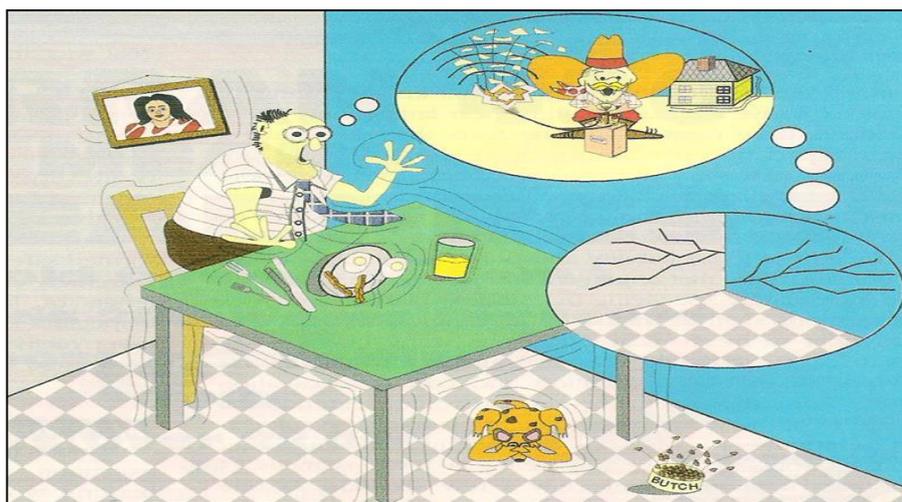


Figura N° 3.7. Efectos de las vibraciones a las estructuras cercanas a una zona de influencia de un disparo primario.

Fuente: ISEE - 2011

- ✓ A continuación se reporta las normativas internacionales de los países donde se desarrollaron estas (Reglamentación en Manejo de Vibraciones (s.f.):

Tabla N° 3.1. Normatividad internacional

Pais de procedencia	Nombre de reglamentación	Fecha de expedición
Alemania ^a	DIN 4150	1975
Brasil	CETESB D7.013	1998
Escocia	PAN50	2000
EEUU - Federal	USBM R18507	1980
EEUU - Federal	OSM 817.67	1983
España	UNE 22-381-93	1993
Francia	Recomendaciones GFEE	2001
Internacional	ISO 4866	1990
Italia	UNI 9916	1991
Nueva Zelanda	NZS 4403	1976
Portugal	NP2074	1983
Reino Unido	BSI 6472	1992
Reino Unido	BSI 7385	1993
Sueca	SS 460 48 46	1991
Suiza	SN 640 312a	1992

^a La norma alemana tiene además tres actualizaciones en los años 1999 y 2001.

Fuente: Reglamentación en manejo de vibraciones.

- ✓ A continuación se mencionan las principales normas internacionales:

3.2.5.1 Alemania: DIN 4150 – Deutsches Institut für Normung

El Instituto de Normalización Alemana o DIN ha publicado varios criterios de niveles máximos de vibraciones, el primero en 1975, el cual fue desglosado en 3 partes y actualizado en 1999 y 2001.

Tabla N° 3.2. Resumen de la norma DIN 4150

Campo de aplicación	Vibraciones producidas por cualquier fuente.
Variables medidas	Velocidad vertical pico [mm/s] y velocidad de partícula pico o resultante [mm/s].

Fuente: Reglamentación en manejo de vibraciones.

La Norma DIN 4150 (1986) fue adoptada como norma patrón, y ha sido actualizada desde entonces. Ella establece los valores límites de velocidad de vibración de la partícula en mm/s, considerando el tipo de estructura civil y el intervalo de frecuencia en Hz, en los cuales demuestran estar fuera de riesgo de daños los edificios. Las tres clases de edificios definidas por la norma son:

- Edificios estructurales o industriales
- Edificios residenciales
- Edificios históricos y construcciones sensibles (madera, barro, etc.)

Las frecuencias son analizadas en tres intervalos, o sea, valores menores de 10Hz, valores entre 10-50Hz y valores entre 50-100Hz. La norma prevé que para frecuencias encima de 100Hz, la estructura soporta niveles altos de vibración. Los valores de velocidad de vibración de partícula definidos varían de 3mm/s, en el caso de monumentos y construcciones delicadas con frecuencia

inferior a 10Hz, hasta 50mm/s en el caso de estructuras industriales con frecuencia entre 50-100Hz. En la evaluación de daños estructurales causados por las vibraciones del terreno, los valores límites de V_p admitidos para diversos tipos de construcciones, en función de la frecuencia, son presentados en la Tabla siguiente.

Tabla N° 3.3. Resumen de la velocidad de partícula de la norma DIN 4150.

Guía de valores máximos para velocidad de partícula DIN 4150 (1999)				
Clase de construcción	Frecuencia fundamental			NS ^a TF ^b
	1 a 10 Hz	10 a 50 Hz	50 a 100 Hz	
1 Edificaciones industriales, oficinas y similares o con diseños robustos	20 ^c	20 – 40	40 – 50	40
2 Edificaciones residenciales y construcciones similares	5	5 – 15	15 – 20	15
3 Otras edificaciones sensibles a vibraciones o las no incluidas en las dos anteriores clases	3	3 – 8	8 – 10	8

Adaptado de DIN (2001a).
^a Nivel Superior componente horizontal.
^b Todas las frecuencias.
^c Velocidades de partícula en mm/s.

Fuente: Reglamentación en manejo de vibraciones.

Tabla N° 3.4. Resumen de la norma DIN 4150.

Velocidades pico recomendadas por la DIN 4150 (1979)		
Clase de Edificación	Valores Indicativos	
	VPP ^a (mm/s)	VVP ^b (mm/s)
I Residencias, oficinas y otras similares construidas de forma tradicional y en condiciones normales	8	4.8 – 8
II Edificaciones estables en condiciones normales	30	18 – 30
III Otras edificaciones y monumentos históricos	4	2.4 – 44

Tomado de Persson et al. (1994).
^a Velocidad de Partícula Pico.
^b Velocidad Vertical Pico.

Fuente: Reglamentación en manejo de vibraciones.

Tabla N° 3.4.1. Valores Representativos

1 – 10 Hz → 3 mm/s.
10 – 50 Hz → 3 – 8 mm/s.
50 – 100 Hz → 8 – 10 mm/s.

Fuente: Reglamentación en manejo de vibraciones.

3.2.5.2 Escocia: PAN 50 Planning Advice Notes

La presente norma se basa en los estándares BSI (British Standard Institute), las guías NPPG (National Planning Policy Guidelines) y las PAN.

El anexo D de la PAN 50 (control de efectos ambientales de trabajos en minería superficial), provee sugerencias para las autoridades encargadas de la planificación, así como a la industria minera de los efectos de las voladuras y de los límites aceptables en este tipo de trabajos. Los impactos que enfatiza esta norma son:

- a. Vibración del suelo
- b. Presión acústica
- c. Ruido
- d. Polvo
- e. Eyección de fragmentos de rocas.

Esta norma trata los ítems de las vibraciones producidas por la voladura de rocas:

- a. Lugar donde se deben realizar las mediciones
- b. Los niveles de amplificación en estructuras, se definen en un rango de frecuencias entre 5 y 40 Hz, donde las estructuras pueden amplificar los movimientos del suelo, y es probable que se presenten daños.
- c. Los umbrales y tipos de daños en las viviendas producidas por vibraciones
- d. Los efectos de la geología en las vibraciones inducidas por voladuras.

Tabla N° 3.5. Resumen de la norma PAN 50.

<i>Resumen de los valores indicativos de la PAN50</i>				
Campo de aplicación	Vibraciones en el suelo producidas por voladuras, pero también presión acústica, ruido, polvo y eyección de rocas.			
Variables medidas	Velocidad pico en cada componente [mm/s] y velocidad de partícula –resultante– pico [mm/s].			
Valores indicativos	de 6 a 10 mm/s en el 95 % de las voladuras en un periodo de 6 meses, para voladuras individuales no debe ser superior a 12 mm/s. Adicionalmente valores en los que se pueden producir daños			
Sensores utilizados	Sensores de tres componentes que registren velocidad.			
Sitio de medición	Sobre el suelo, cerca de la fachada mas cercana al sitio de voladura, cuando hay quejas también se realizan mediciones dentro de la estructura.			
<i>Valores de velocidad de partícula pico asociados con diferentes tipos de daños en la norma PAN50 Anexo D - Escocia</i>				
Tipo de daño	Características	Valores Indicativos (mm/s)		
		< 4 Hz	4 – 15 Hz	> 15 Hz
Cosmético	Formación de grietas finas, crecimiento de grietas existentes en estuco, paredes delgadas o mortero.	15	20	50
Menor	Formación de grietas largas, pérdida o caída de superficies de estuco, grietas en bloques de concreto y ladrillo.	30	40	100
Estructural	Daño en elementos estructurales.	60	80	200

Fuente: Reglamentación en manejo de vibraciones.

Tabla N° 3.5.1. Valores Representativos

< 4 Hz	→ 15 mm/s.
4 – 15 Hz	→ 20 mm/s.
> 15 Hz	→ 50 mm/s.

Fuente: Reglamentación en manejo de vibraciones.

3.2.5.3 EE. UU: OSM 817.67

OSMRE (Office of Surface Mining, Reclamation and Enforcement). Esta norma se desarrolló para la minería de carbón. Establece procedimientos para determinar los límites de velocidades de vibraciones, dependiendo del nivel de monitoreo.

A continuación se presentan las características fundamentales de esta norma.

Tabla N° 3.6. Resumen de la norma OSM 817.67

<i>Resumen de los valores indicativos de la norma OSM 817.67</i>	
Campo de aplicación	Vibraciones en el suelo producidas por voladuras en minas de carbón.
VARIABLES MEDIDAS	Velocidad de partícula pico [mm/s] en cada componente o velocidad resultante pico [mm/s] del arreglo tridimensional de sensores.
Valores indicativos	25.4 mm/s a distancias entre 100 y 1500 m y 19.0 mm/s para distancias superiores
Sensores utilizados	Sensores de tres componentes que registren velocidad.
Debilidades	No es autosuficiente, necesita de la USBM R18507 cuando se necesite utilizar la frecuencia en el análisis.

Fuente: Reglamentación en manejo de vibraciones.

3.2.5.4 España: UNE 22-381-93

La Norma Española para el control de vibraciones (UNE 22-381-93) es creada en 1993 con el fin de establecer un procedimiento de estudio y control sobre vibraciones producidas por voladuras de rocas con mezclas explosivas comerciales. Dicha norma es aplicable a diferentes tipos de trabajos donde se realice voladura de rocas, ya sea para minería, canteras, obras civiles y demoliciones, etc.

Dentro de la norma se clasifican tres tipos de estructuras que son las siguientes:

- Grupo I: Edificios y naves industriales (Estructuras de hormigón armado o metálicas).
- Grupo II: Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreación.
- Grupo III: Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico.

Al igual que en la normal alemana DIN 4150 y la mayoría de las normas europeas, la norma española analiza la frecuencia entre intervalos: Entre 2 y 15 Hertz, entre 15 y 75 Hertz y mayores a 75 Hertz.

Para la velocidad de la partícula producida por la vibración, existen varios márgenes en la UNE 22-381-93 en donde varían de los 4mm/s como velocidad más baja, relacionada con las estructuras arqueológicas asociadas a frecuencias entre 2 y 15 Hertz; y velocidades hasta los 100mm/s correspondiente a edificios industriales asociadas a frecuencias mayores a 75Hz.

Tabla N° 3.7. Resumen de la norma UNE 22-381-93

<i>Valores de velocidad máximos en mm/s y frecuencias para la prevención de daños según la norma española UNE 22-381-93</i>			
Tipo de estructura	Frecuencia principal (Hz)		
	2 – 15 Vel. ^b	15 – 75 ^a Desp. ^c	>75 Vel.
I Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.	20	0.212	100
II Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa española. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones	9	0.095	45
III Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener	4	0.042	20

Con base en AENOR (1993).

^a En el tramo de frecuencias comprendido entre 15 y 75 Hz, en los que el nivel está dado en desplazamiento, se podrá calcular la velocidad equivalente conociendo la frecuencia principal a través de la ecuación

$$V = 2\pi f d,$$

donde V es la velocidad de vibración equivalente en mm/s, f es la frecuencia principal en Hz y d es el desplazamiento admisible en mm indicado en la tabla.

^b Velocidad máxima en mm/s.

^c Desplazamiento máximo en mm

Fuente: Reglamentación en manejo de vibraciones.

Tabla N° 3.7.1. Valores Representativos

2 – 15 Hz → 20 mm/s.
15 – 75 Hz → 20 – 100 mm/s.
> 75 Hz → 100 mm/s.

Fuente: Reglamentación en manejo de vibraciones.

3.2.5.5 Suiza: SN 640 315

Antes de 1992, Suiza adoptaba una norma referente a los valores para salvaguardar la infraestructura de los edificios, esta se refería a la componente vertical de la velocidad, medida en la fundación de los edificios.

Los límites de intensidad de velocidad de vibración de partícula variaban de 25mm/s para museos hasta 100mm/s para

construcciones en concreto armado. Esta norma contempla frecuencias desde 8 hasta los 150 Hz, y establece que por encima de este rango deben ser estudiadas con base en otras normas.

A continuación se presenta los aspectos más resaltantes de esta norma Suiza.

Tabla N° 3.8. Resumen de la norma SN 640 315

<i>Aspectos importantes en la reglamentación Suiza SN 640 315a (1992)</i>	
Campo de aplicación	Vibraciones por voladuras, maquinaria, equipo de construcción, tráfico en carreteras y ferroviario.
VARIABLES MEDIDAS	Velocidad resultante –de partícula– pico [mm/s], frecuencia de la vibración [Hz] relacionada con la componente de máxima velocidad, adicionalmente la cantidad de sacudidas
Sensores utilizados	Tres componentes ortogonales de sensores que registren velocidad en mm/s con un rango lineal entre 5 y 150 Hz
Ubicación sensores	Sobre la estructura
Fortalezas	Brinda criterios para definir daño no estructural –fisuras en mampostería

Fuente: Reglamentación en manejo de vibraciones.

3.2.6 Lanzamientos de fragmentos de roca. Puede ser definido como un excesivo y/o indeseable proyección de fragmentos de roca o escombros provenientes del disparo primario en minería superficial.

También, es definido como el impacto ambiental más peligroso inducido por la voladura de rocas.

Otros investigadores lo definen como un riesgo potencial que puede causar la muerte, lesiones muy graves y daños a las propiedades aledañas a la zona del disparo (Lundborg, N., 1974).



Figura N° 3.8. Excesivo lanzamientos de fragmentos de rocas.
Fuente: Eyecciones y Flyrock 2006

También, puede ser definido como el lanzamiento excesivo de los fragmentos de roca que sobrepasan los límites de las propiedades donde se llevan a cabo las operaciones mineras.

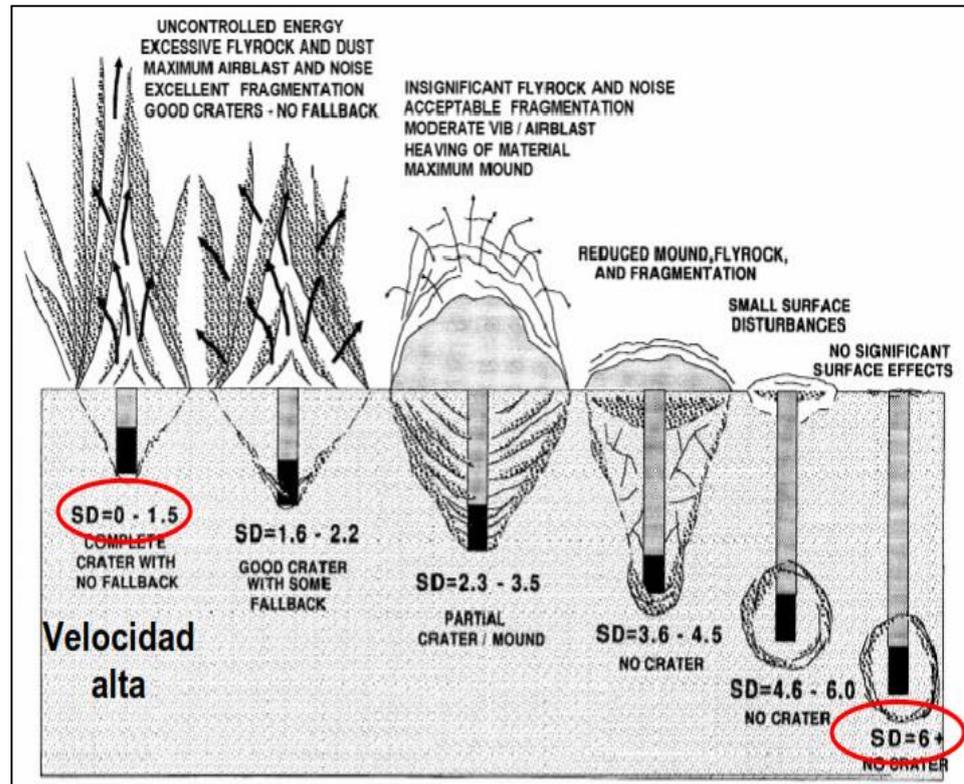


Figura N° 3.9. Longitudes de Taco.

Fuente: Chiappetta, R., Bauer, A., Dailey, P. and Burchell, S., 1983

3.2.7 Subsistencia. La subsistencia, es el hundimiento del terreno (generalmente se observa en pistas). También, es un fenómeno asociado a la explotación minera, pero cabe enfatizar que también es un fenómeno natural que casi no se puede controlar.

Los primeros reportes que relacionan los hundimientos del terreno con la extracción de agua fueron realizados por R. Fuller en 1908 (Poland, 1984). El primero en tratar de explicar científicamente el fenómeno fue Terzaghi (1925) quien propone una ecuación de consolidación unidimensional.

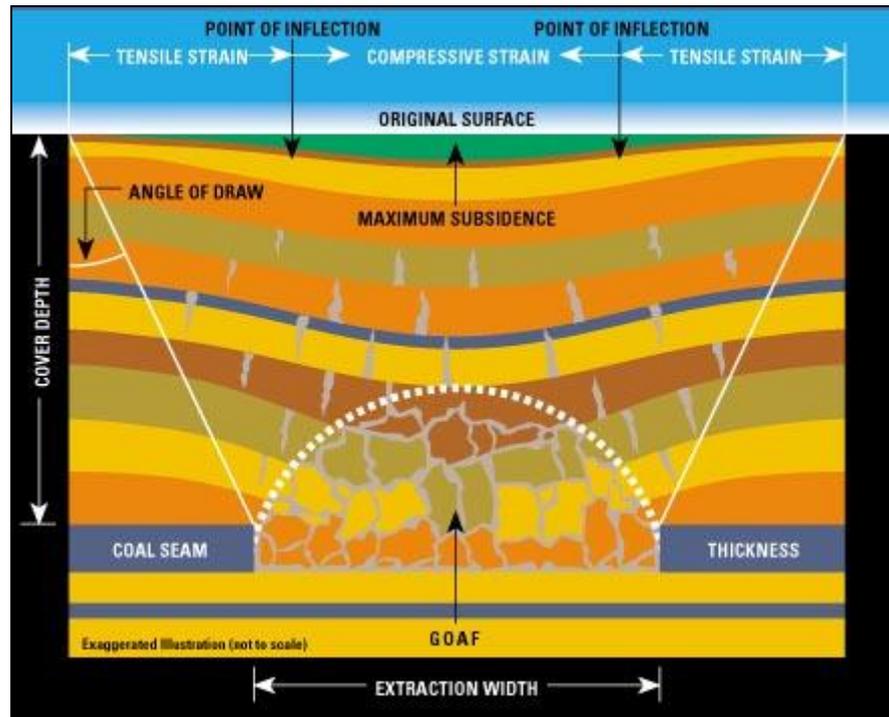


Figura N° 3.10. Subsidencia inducida por la voladura de rocas.

Fuente: Restauración y Remediación de Terreno.

Para mitigar la subsidencia puede ser que una vez identificada las zonas afectadas por subsidencia y las zonas susceptibles de experimentar estos fenómenos en el futuro, lógicamente la estrategia de mitigación más segura consiste en evitar las zonas potencialmente peligrosas.

Esta medida preventiva puede ponerse en práctica mediante la planificación territorial y el desarrollo de normativas orientadas a limitar los usos en dichas zonas. Dado que los procesos que intervienen en los fenómenos de subsidencia son difícilmente controlables por actuar bajo la superficie, las medidas correctivas frecuentemente deben centrarse en la protección de las estructuras.



Figura N° 3.11. Efecto de la subsidencia en el suelo (Mina de Potasio
08/14 - Rusia).

Fuente: Obtenido de página Web N° 3.

IV. Principales causas y gases que se generan durante la voladura de rocas

En general se puede aseverar que la detonación de una mezcla explosiva comercial que no ha logrado un equilibrio óptimo de las temperaturas producirá gases tóxicos. Esta condición puede resultar por los siguientes factores:

- Detonaciones parciales.
- Detonaciones de bajo orden.
- Deflagraciones.
- Formulación inadecuada de los ingredientes que componen la mezcla explosiva comercial.
- Materias extrañas inyectadas dentro de las mezclas explosivas comerciales durante su fabricación.
- Inadecuados procedimientos durante el carguío de las mezclas explosivas comerciales a los taladros.
- Los ingredientes que no cumplen con las especificaciones técnicas para las mezclas explosivas comerciales
- Insuficiente diámetro de taladro.
- Iniciación inadecuada.
- Remoción de la cobertura de los cartuchos.
- Taladros húmedos o con agua.
- Inadecuado diseño de las mallas de perforación y voladura.
- Inadecuado diseño de carga, etc.

Por lo tanto, las condiciones bajo las cuales una mezcla explosiva comercial es usada tienen una influencia determinante en las clases y las cantidades de gases tóxicos generados (Roy, P 2011).



Figura N° 4.1. Generación de gases tóxicos al detonar una mezcla explosiva comercial.

Fuente: Dyno Consult 2003

Entonces, se puede enfatizar que la detonación de cualquier mezcla explosiva comercial, es realmente una reacción química muy rápida entre un oxidante y un combustible. La reacción química ideal es diseñada por el ingeniero encargado de llevar a cabo estas formulaciones, teniendo en cuenta que dichas formulaciones no deben producir gases tóxicos como productos de la detonación, los productos que deben producir son: H_2O , CO_2 y N_2 ; pero desafortunadamente en el mundo real no se producen reacciones químicas ideales en las diversas operaciones de voladura de rocas. Es por esta razón que, algunos productos tóxicos pueden ser producidos durante la detonación de las mezclas explosivas comerciales, estos son productos de la reacción química mencionada anteriormente son los llamados “gases tóxicos”. Se debe tener en cuenta que los “gases tóxicos” que más deben ser monitoreados, detectados y controlados son (Van Dolah, R. W, Murphy, C. J and Hanna, N. E. 2009):

- Óxidos nitrosos (NO_x)
- Monóxidos de carbono (CO)

Porque si los gases tóxicos mencionados anteriormente están presentes en suficientes concentraciones; esto podría ser fatal para las personas que se encuentran cercanamente al área de trabajo; especialmente para el personal que trabaja en operaciones mineras subterráneas.



Figura N° 4.2. Accidente fatal por asfixia de los gases tóxicos.

Fuente: Elaborado por el investigador.

Se debe mencionar que, las recomendaciones que vienen del fabricante en las fichas para el uso de mezclas explosivas comerciales, también deben incluir los daños que los gases tóxicos producen.

Después de llevarse a cabo un disparo; se debe permitir un tiempo prudencial para que dichos gases tóxicos se disipen, como se reitera especialmente en operaciones mineras subterráneas, ya que estas necesitan de ventilación artificial.



Figura N° 4.3. Operación minera subterránea y superficial.

Fuente: Operación de Voladura Subterránea.

Por otro lado, los monitoreos del monóxido de carbono (CO) deben ser llevados a cabo usando métodos aprobados y actualizados; así como también usar los equipos modernos y de última generación y los implementos de seguridad. Estos monitoreos deben llevarse a cabo después del disparo y antes que el personal regrese al área de trabajo. En operaciones mineras subterráneas se debe contar con buenos sistemas de ventilación para contribuir a disipar los gases tóxicos.

Los investigadores inmersos en esta materia, definen a la calidad como la medida de la cantidad de gases tóxicos producidos por la detonación de una mezcla explosiva comercial. Estos gases son principalmente monóxido de carbono (CO) y los óxidos nitrosos (NOx).

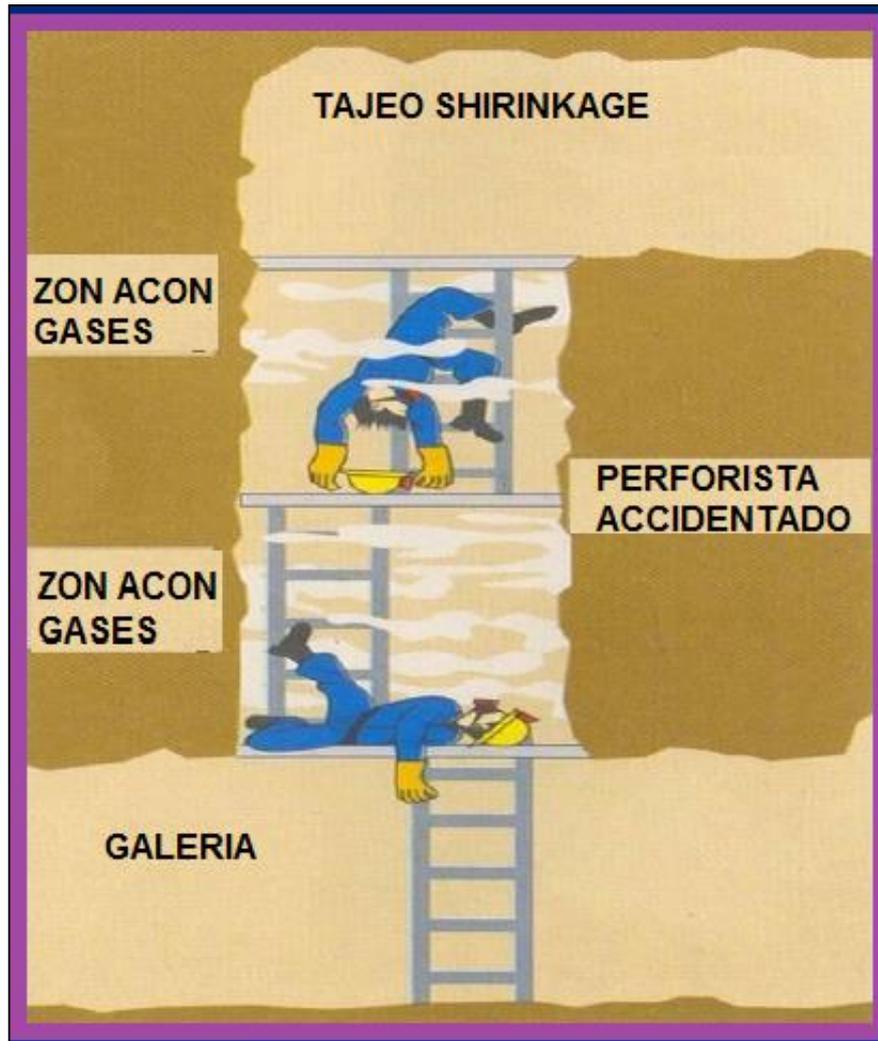


Figura N° 4.4. Trabajadores accidentados en una mina subterránea.
Fuente: Operación de Voladura Subterránea.

4.1 Gases tóxicos producidos por la voladura de rocas

4.2 Definición.

En la operación minera unitaria de voladura de rocas en general el término “humos” se refiere al conjunto de los productos resultantes de la explosión, entre los que se encuentran los gases, vapor de agua y polvo en suspensión. Los gaseosos tóxicos producidos ocasionan molestias, intoxicaciones graves y la muerte a las personas.

4.3 Clasificación general de los gases tóxicos

La clasificación de los gases tóxicos, es muy importante especialmente en operaciones mineras subterráneas donde deben ser usados solamente explosivos clase I. Sin embargo es muy importante permitir suficiente tiempo para que los gases tóxicos se disipen, después de que se realizan los disparos.



Figura 4.5: Operaciones mineras subterráneas con sus respectivas mangas de ventilación.

Fuente: Operación de Voladura Subterránea.

En minería superficial los gases de color anaranjados y marrones asociados con los óxidos de nitrógeno son significativamente peligrosos; y estos se combinan con agua en los pulmones y se puede formar ácido nítrico.



Figura N° 4.6: Operación minera unitaria de voladura de rocas en un tajo abierto.

Fuente: Dyno Consult 2003

Se debe mencionar que un exceso de oxígeno en la mezcla explosiva comercial tiende a la formación de óxidos de nitrógeno, mientras que cuando hay deficiencia de oxígeno tiende a formarse monóxido de carbono (CO).

4.3.1 Dióxido de carbono (CO₂)

Gas constituyente de la atmósfera conocida como “gas oscuro o negro”. Este gas ocurre en muy pequeña cantidad en el ambiente común. Es concentrado en gran cantidad después de una detonación; en otras palabras es producto de una combustión completa u oxidación cuando este es respirado en una cantidad mayor que la normal, tiene un efecto tóxico sobre el sistema humano.

Este gas tiene una gravedad específica de 1.529, esto es más pesado que el aire. Es incoloro e inodoro, tiene un ligero sabor ácido, no es combustible ni mantiene la combustión. El dióxido de carbono es un producto de la combustión completa y en las minas es producido por la respiración de las personas y otras formas de combustión.

La presencia de este gas en exceso reduce la cantidad de oxígeno en el aire, el porcentaje de CO₂ es necesario para extinguir la llama, depende de la naturaleza de la llama y la cantidad de oxígeno presente. La llama

de la lámpara de carburo es menos susceptible para extinguirse con el dióxido de carbono que las velas o llamas de sustancias grasas.

Este gas no puede ser clasificado como un gas de mina venenoso, aunque ejerce un ligero efecto tóxico sobre el organismo de la persona. Es irrespirable cuando no está mezclado con el aire, y si es respirado por exceso de tiempo produce muerte por sofocación.

Los efectos en el hombre por inhalación del CO₂ se muestran en la tabla siguiente.

Tabla N° 4.1. Efectos producidos por inhalación de CO₂

%	Concepto
0.5	Límites máximos permisibles. No se produce malestar
3	Causa ligera dificultad en la respiración
5- 6	Causa palpitaciones
> 6	Fatal en la mayoría de los casos

Fuente: Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo ESPAÑA

El CO₂, es concentrado en estratos de la roca en muchas minas de metal; mayormente en zonas de roca caliza. Debido a su alta gravedad específica es siempre encontrado a ras del suelo en labores bajas.

Definición: El dióxido de carbono, también denominado óxido de carbono (IV), gas carbónico y anhídrido carbónico, es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono. Su fórmula molecular es CO₂.

4.3.2 Nitrógeno

Este gas es el más abundante en el ambiente, su contenido es cerca de los 4/5 de la atmosfera de la tierra. Es inerte, no se enciende y tampoco es venenoso.

El nitrógeno es un elemento químico, de número atómico 7, símbolo N y que en condiciones normales forma un gas diatómico (nitrógeno diatómico o molecular) que constituye del orden del 78% del aire atmosférico.

4.3.3 Vapor de agua

El vapor es definido como cualquier sustancia en condición gaseosa a un máximo de densidad consistente con dicha condición. El vapor de agua es un gas que se obtiene por evaporación o ebullición del agua líquida o por sublimación del hielo. Es inodoro e incoloro.

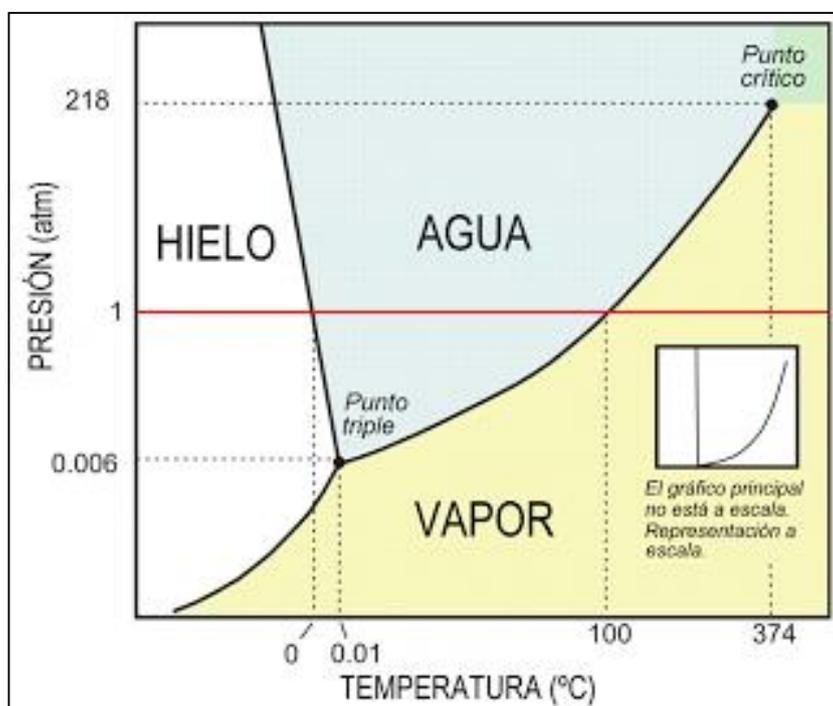


Figura N° 4.7. Diagrama de fases del agua.

Fuente: Obtenida de página Web N° 2.

4.3.4 Monóxido de carbono (CO)

Este gas es el más venenoso y generalmente se encuentra en la minería, también es conocido como gas blanco, es el producto de la combustión incompleta de sustancias carbonosas, no mantiene la combustión, pero no puede ser detectado por la llama. El monóxido de carbono también denominado óxido de carbono (II), gas carbonoso y anhídrido carbonoso (los dos últimos cada vez más en desuso) cuya fórmula química es CO, es un gas inodoro, incoloro y altamente tóxico. Puede causar la muerte cuando se respira en niveles elevados.

El monóxido de carbono tiene una gravedad específica de 0.967, es decir tiene aproximadamente el mismo peso que el aire; por lo que es difícil diferenciarlo. Este gas es incoloro, inodoro e insípido, como se mencionó anteriormente es extremadamente venenoso; el monóxido de carbono es uno de los gases más peligrosos que se tienen, y es la causa del 90% de los accidentes fatales en la mina.

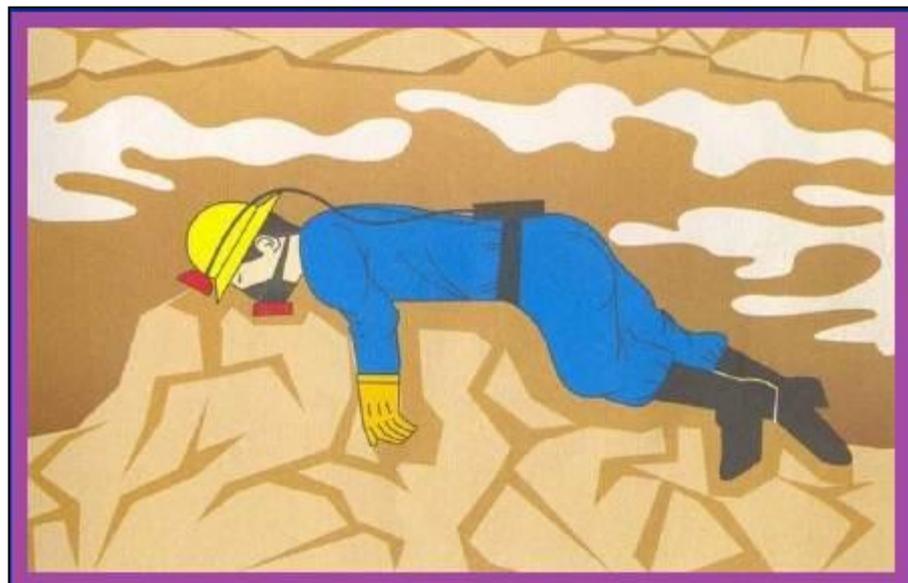


Figura N° 4.8: Trabajador gaseado en una mina subterránea.

Fuente: Operación de Voladura Subterránea.

Este gas se produce siempre durante los incendios en minas, explosiones de gas, disparo y detonan de explosivos y del escape de los motores de combustión.

En concentraciones de 12.5% a 74% es explosivo. La exposición de CO ejerce una acción extremadamente peligrosa sobre el cuerpo por desplazamiento del oxígeno en su combinación con la hemoglobina, disminuye la capacidad que tiene la sangre para transportar oxígeno a los tejidos. Cuando el CO es absorbido, se combina con la hemoglobina tiene de 210 a 240 veces mayor afinidad por el monóxido de carbono que por el oxígeno, esto es, que la hemoglobina prefiere tomar CO en lugar de oxígeno.

La presencia de CO en el ambiente produce los siguientes efectos en una persona, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.2. Efectos producidos por inhalación de CO

%	Concepto
0.005 (50 PPM)	Límites máximos permisibles en ambiente. No produce malestar
0.02 (200 PPM)	Produce ligero dolor de cabeza en muchas horas
0.04	Produce dolor de cabeza e incomodidad en 2 horas
0.12	Produce palpitaciones del corazón en 30 minutos, con tendencia a tambalear en 1 ½ horas.
0.2	Produce inconciencia en 30 minutos.

Fuente: Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo
ESPAÑA

Normalmente la sangre de las personas no expuestas a CO contiene aproximadamente 1% de CO, probablemente como resultado del

metabolismo normal de la hemoglobina. Las exposiciones a concentraciones de 50PPM de CO en el ambiente pueden dar como resultado niveles de COHb (carboxihemoglobina) de hasta 10% en una exposición diaria de 8 horas. Los síntomas por presencia de CO en la sangre de las personas, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 4.3. Efectos de % de COHb en el cuerpo.

% Saturación de COHb en sangre	Síntomas
0 a 10	Nada
15 a 25	Dolores de cabeza, palpitaciones en la sien, nauseas.
40	Colapso, sincope
60 a mas	Fatal

Fuente: Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo ESPAÑA

Los síntomas se reducen en número con el incremento de saturación. Si se expone a altas concentraciones, las victimas pueden experimentar poco o ningún síntoma, y puede fallecer casi instantáneamente.

4.3.5 Óxidos nitrosos (NO₂)

El dióxido de nitrógeno u óxido de nitrógeno (IV) (NO₂), es un compuesto químico formado por los elementos nitrógeno y oxígeno, uno de los principales contaminantes entre los varios óxidos de nitrógeno. El dióxido de nitrógeno es de color marrón-amarillento. Se forma como subproducto en los procesos de combustión a altas temperaturas.

4.3.6 Óxidos nítricos (NO)

El óxido de nitrógeno (II), óxido nítrico o monóxido de nitrógeno (NO) es un gas incoloro y poco soluble en agua presente en pequeñas cantidades en los mamíferos. Está también extendido por el aire siendo producido en automóviles y plantas de energía. Se lo considera un agente tóxico.

Los gases nitrosos ($\text{NO} + \text{NO}_2$) formados por óxidos nitrosos se encuentran normalmente en minas luego de realizar la operación minera unitaria de voladura de rocas con mezclas explosivas comerciales como la dinamita, y en concentraciones aún mayores cuando se utiliza el AN/FO. Estos gases son más peligrosos que H_2S y sus efectos en los ojos y en el sistema respiratorio son más o menos los mismos que los producidos por el H_2S o el SO_2 .

Con los gases nitrosos existe el grave peligro de bronquitis aguda, que es a menudo fatal. Un aparente restablecimiento es experimentado, pero frecuentemente sigue bronquitis en unas horas y la muerte puede sobrevivir en 2 o 3 días. El límite máximo permisible establecido para estos gases es de 5PPM por volumen.

4.4 Clases de gases nocivos por el instituto de fabricantes de explosivos

Se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.4. Clases de gases nocivos según su concentración.

Clases de gases nocivos	Pies cúbicos de gases venenosos por 200 gr de mezcla explosiva comercial.
1	0.16
2	0.16 – 0.33
3	0.33 - 0.67

Fuente: Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo ESPAÑA

Los estándares límites de volumen de gases venenosos producidos por mezcla explosiva, es de $< 2.5 \text{ pie}^3/\text{Lb}$.

Por tanto la generación de estos gases tóxicos durante la operación minera unitaria de voladura de rocas, ha sido explicada en los párrafos anteriores de este capítulo; de tal manera que todo el personal que está involucrado en la formulación de las mezclas explosivas comerciales, diseño de las mallas de perforación y voladura (B x S), diseño de las cargas con explosivos, carguío dentro de los taladros, conexiones, iniciación, etc. Estén bien entrenados, capacitados y actualizados; porque solo así se evitara la generación de gases tóxicos y por ende accidentes fatales.

V. Formulación de los agentes de voladura

La voladura de rocas, es la operación minera unitaria más importante dentro de las operaciones de minado; porque de ello depende la eficiencia de las dos sub siguientes operaciones como es carguío, acarreo para lograr una mayor producción y productividad. (Per Anders Persson et al. (s.f.))

Lo ideal, es diseñar un agente de voladura e implementarlo en el campo cumpliendo condiciones tecnológicas, económicas y ecológicas; de tal manera, que se pueda determinar una formulación adecuada y porque no decirlo optima de acuerdo al requerimiento de “energía” necesaria para el fracturamiento y movimiento del macizo rocoso.



Figura N° 5.1. Fragmentación como resultado de una voladura de rocas.

Fuente: Elaborado por el investigador.

5.1 Definiciones

5.1.1 Agentes de voladura

Son mezclas que contienen nitratos inorgánicos y algunos combustibles carbonáceos, los cuales pueden contener sustancias adicionales no explosivas, tales como: Aluminio, azufre, carbón, etc.

Algunas limitaciones de los agentes de voladura son la baja resistencia al agua (por la alta higroscopicidad del nitrato de amonio en los prills), baja densidad a granel que varía en caída libre de 0.85 gr/cc a 1.20 gr/cc cuando es confinado siendo más sensible, baja presión de detonación a granel en taladros húmedos, etc.



Figura N° 5.2. Agente de voladura y los boosters respectivos

Fuente: Elaborado por el investigador.

5.2 Especificaciones técnicas que deben reunir los agentes de voladura para ser óptimos.

La única manera de obtener la elaboración adecuada de un agente de voladura es empleando ingredientes que cumplan estrictamente con las

especificaciones técnicas establecidas por la normativas internacionales especializadas, para lo cual deben pasar un estricto control de calidad.

Así por ejemplo el nitrato de amonio (AN) debe tener una capacidad de absorción y retención suficiente como para retener mínimo 6% de petróleo Diesel N° 02. Los prills de nitrato de amonio deben tener una estructura porosa para retener mayor cantidad de petróleo Diesel N° 2, dando un producto de alta eficiencia y gran sensibilidad.

Otro ejemplo sería que los aceites usados (residuales) sean aprovechados previo tratamiento como combustible, esto sería un buen aporte para minimizar los costos del AN/FO, AL/AN/FO, etc.

A continuación se muestran las especificaciones técnicas de los ingredientes de los agentes de voladura.

5.2.1 Especificaciones técnicas del nitrato de amonio (AN: NO_3NH_4)

Tabla N° 5.1. Especificaciones técnicas del Nitrato de Amonio

Especificaciones	
Apariencia	Sólido blanco granulado, color uniforme sin materiales extraños
Contenido de nitrógeno total	34.5 % min.
Humedad	0.3 gr/cc max.
Densidad en caída libre	0.80 gr/cc max.

Fuente: Porter, P ISEE - USA, 2007

Tabla N° 5.1.1. Tamaño de partículas.

Tamaño de partículas	
Malla N°	% Retenido
6	0
10	6 max.
14	65 min.
18	25 max.
35	10 max.

Fuente: Porter, P ISEE - USA, 2007

5.2.2 Especificaciones técnicas del aluminio granulado

Tabla N° 5.3. Especificaciones técnicas del Aluminio Granulado

Especificaciones	
Apariencia	Sólido de libre fluidez
Pureza	90 % min.
Otros	10% max.
Densidad aparente	0.65 – 0.85 gr/cc max.

Fuente: Porter, P ISEE - USA, 2007

Tabla N° 5.3.1. Tamaño de partículas

Tamaño de partículas	
Malla N°	% Retenido
18	0
100	95 min.
(pasa) 150	5 max.

Fuente: Porter, P ISEE - USA, 2007.

5.2.3 Especificaciones técnicas del petróleo diésel N° 2 (FO)

Tabla N° 5.4. Especificaciones técnicas del Petróleo Diesel N°2

Especificaciones	
Apariencia	Líquido fluido
Peso específico	0.83 gr/cc min.
Punto de inflamación	88.93°C

Fuente: Porter, P ISEE - USA, 2007

2.3. Definición de términos básicos

- ✓ **Optimización de Agentes de Voladura:** Es lograr un balance físico-químico ideal que dé como resultado, una mezcla explosiva que sea eficaz y eficiente desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.
- ✓ **Control.** Dominio, mando o preponderancia, sobre el sistema de formulación de agentes de voladura óptimos.
- ✓ **Mitigación.** Conjunto de medidas que se pueden tomar para contrarrestar o minimizar los impactos negativos causados por los gases tóxicos producidos por la voladura de rocas.
- ✓ **Gases.** Producidos por la detonación de un agente de voladura, debido a una inadecuada formulación respecto a sus proporciones y balance de materia-energía.
- ✓ **Monitoreo.** Observación del curso de uno o más parámetros para detectar eventuales anomalías o deficiencias perjudiciales provenientes de la voladura de rocas

CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS

3.1. Formulación de la hipótesis

Al optimizar los agentes de voladura mediante la aplicación de un modelo matemático que logre un balance físico-químico ideal, se logrará el control y/o mitigación de los gases tóxicos producidos al ser detonados.

3.2. Operacionalización de variables

3.2.1 Variable independiente

- ✓ **Optimización de Agentes de Voladura:** Es lograr un balance físico-químico ideal, que dé como resultado una mezcla explosiva que sea eficaz y eficiente desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.
- ✓ **Control.** Dominio, mando o preponderancia, sobre el sistema de formulación de agentes de voladura óptimos.
- ✓ **Mitigación.** Conjunto de medidas que se pueden tomar para contrarrestar o minimizar los impactos negativos causados por los gases tóxicos producidos por la voladura de rocas.

3.2.2 Variable dependiente

- ✓ **Gases.** Producidos por la detonación de un agente de voladura, debido a una inadecuada formulación respecto a sus proporciones y balance de materia-energía.

3.2.3 Variable interviniente

- ✓ **Monitoreo.** Observación del curso de uno o más parámetros para detectar eventuales anomalías o deficiencias perjudiciales provenientes de la voladura de rocas

Tabla N° 3.1. Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE INDEPENDIENTE			
Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
Optimización de Agentes de Voladura	Es lograr un balance físico-químico ideal, que dé como resultado una mezcla explosiva que sea eficaz y eficiente desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Balance de oxígeno (B_o). ✓ Calor de Explosión (Q_3). ✓ Fragmentación y desplazamiento de roca. ✓ Costo por tonelada de material removido. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Balance de oxígeno igual o tendiente a cero (0) ✓ Calor de explosión máximo en Kcal/Kg ✓ Adecuada fragmentación y desplazamiento del material removido que facilite el carguío y transporte ✓ Costo mínimo por tonelada de material volado.

Fuente: Elaborado por el investigador.

Tabla N° 3.2. Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE INDEPENDIENTE				
Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Subdimensiones	Indicadores
Control	Dominio, mando o preponderancia, sobre el sistema de formulación de agentes de voladura óptimos.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Planeación Estratégica. ✓ Ensayos de laboratorio. ✓ Estandarización para cada área y proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Balance de oxígeno (B_o) y calor de explosión (Q₃) ✓ Coloración ideal de gases. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Resultados tendientes a lo óptimo en B_o y Q₃. ✓ Coloración gris claro

Fuente: Elaborado por el investigador.

Tabla N° 3.3. Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE INDEPENDIENTE			
Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
Mitigación	Conjunto de medidas que se pueden tomar para contrarrestar o minimizar los impactos negativos causados por los gases tóxicos producidos por la voladura de rocas.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Estrategias de Control. ✓ Tratamiento. ✓ Disminución. ✓ Eliminación. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Consecuencias negativas técnicas, económicas y ambientales mínimas para el proyecto y la zona donde se desarrolla la actividad minera.

Fuente: Elaborado por el investigador.

Tabla N° 3.4. Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE DEPENDIENTE			
Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
Gases	<p>Gas. Fluido sin forma ni volumen propios, cuyas moléculas tienden a separarse.</p> <p>Gas Tóxico. Producidos por la detonación de un agente de voladura, debido a una inadecuada formulación respecto a sus proporciones y balance de materia-energía.</p>	<p>✓ Datos registrados por equipos de monitoreo de gases tóxicos.</p> <p>✓ Datos visuales obtenidos por cámaras de alta velocidad</p>	<p>✓ Datos que sobrepasan los límites máximos permitidos de exposición (Partes por millón - ppm).</p> <p>✓ Coloración de gases que evidencian una deficiente mezcla explosiva (gas gris oscuro, gas café, naranja o rojizo ocre)</p>

Fuente: Elaborado por el investigador.

Tabla N° 3.5. Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE INTERVINIENTE			
Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
Monitoreo	Observación del curso de uno o más parámetros para detectar eventuales anomalías o deficiencias perjudiciales provenientes de la voladura de rocas.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La identificación de conflictos o problemáticas. ✓ La manifestación de los conflictos detectados. ✓ La disponibilidad de información. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Coloración anormal de gases emanados. ✓ Fragmentación deficiente y baja productividad operacional. ✓ Datos obtenidos constantemente con equipos propios.

Fuente: Elaborado por el investigador.

CAPÍTULO 4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Tipo de diseño de investigación.

La investigación es de diseño No Experimental, Transversal Descriptiva, Correlacional y Explicativa.

De diseño No Experimental ya que las variables no son manipulables debido a las limitaciones y carácter teórico de la investigación; y transeccional o transversal porque el objeto de estudio está basado en un momento único y definido que es al detonar agentes de voladura.

- ✓ Es descriptiva porque trata algunos aspectos y características asociadas a la operación unitaria de voladura de rocas.
- ✓ Es correlacional al comparar las características técnicas entre los dos agentes de voladura tomados para este trabajo de investigación respecto a Balance de Oxígeno (B_o), Calor de Explosión (Q_3) y productos gaseosos.
- ✓ Es explicativa porque explicó algunas causas de la generación de gases tóxicos producidos al detonar agentes de voladura mal formulados.

4.2. Material.

4.2.1. Población.

La población está dada por los explosivos con los que se ataca el macizo rocoso en proyectos de extracción de minerales, los cuales pueden clasificarse en bajo explosivo, agente de voladura y alto explosivo; y que al ser usados generan grandes volúmenes de gases.

4.2.2. Muestra.

Para el presente estudio, se tomó en cuenta como muestra la clase de mezcla explosiva comercial denominada agentes de voladura, que por las características técnico-económico-ambientales favorables que aporta a los proyectos en la operación unitaria de voladura de rocas, es usada con

mayor frecuencia en la minería peruana tanto en operaciones subterráneas como superficiales.

4.2.3. Unidad de estudio.

Se tomó como unidad de estudio a dos agentes de voladura, que son el AN/FO y AL/AN/FO; los cuales serán analizados en tema de balance físico-químico, liberación de energía y los gases que producen al ser detonados.

4.3. Métodos.

4.3.1. Técnicas de recolección de datos y análisis de datos

Dado el carácter teórico y limitaciones de la investigación, respecto a la recolección y análisis de datos sobre monitoreo de gases tóxicos y restricción a operaciones mineras de voladura de rocas, la técnica utilizada ha consistido en revisión bibliográfica y sólo se referenciará este aspecto de la investigación de manera general; sin embargo se describirá cómo, y con qué equipos se ha ido realizando la tarea de monitoreo de gases.

Para el monitoreo de gases tóxicos existen una serie de equipos que han ido evolucionando en el tiempo, en tecnología y eficiencia; quiere decir, desde equipos que necesitan una serie de pasos para detectar acumulaciones de gases, hasta equipos digitales muy precisos.

Cada equipo, en su fabricación pasa por una serie de pruebas y estándares antes de su comercialización, ya que de ello depende la seguridad de ciertos trabajos de alto riesgo como es el caso de la industria minera.

A continuación se describen algunos equipos para monitoreo de gases:

4.3.1.1 Equipos para monitoreo de gases tóxicos producidos por la detonación de agentes de voladura

Cada vez toma más fuerza la idea de que es posible desarrollar actividades económicas dentro del concepto de sostenibilidad. Lo que conlleva la necesidad de “un desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades”.

Para que se continúe construyendo el camino que permita alcanzar esta meta es necesario que el ser humano tenga una visión en la que el uso sostenible de los recursos naturales sea parte fundamental del desarrollo económico y social de los pueblos de cualquier nación.

Será indispensable en esta tarea una interacción adecuada entre la conservación del ambiente, la aplicación de tecnologías limpias, el cumplimiento de la normatividad nacional e internacional existente. Este panorama plantea la necesidad de evaluar con practicidad, claridad y conocimiento, los efectos causados por las actividades de la industria minera y proponer soluciones ajustadas a la normatividad internacional ambiental existente y a los avances tecnológicos disponibles.

La industria extractiva minera desarrolla una serie de actividades y operaciones mineras unitarias típicas, sin las cuales es imposible llevar a cabo la explotación de cualquier cuerpo mineralizado. Estas actividades y operaciones mineras implican múltiples interacciones con el entorno natural del ambiente, por lo que representan una oportunidad para prevenir, minimizar, controlar y/o mitigar los impactos ambientales causados por la industria minera; como es el caso de la operación minera unitaria de voladura de rocas, donde se debe tener especial cuidado en los impactos ambientales causados por esta operación minera.

De manera que se debe haber planificado estratégicamente la implementación de planes de manejo ambiental basados en buenas prácticas ambientales y la implementación de tecnologías modernas para evitar, controlar y/o mitigar este aspecto ambiental denominado gases tóxicos.

Para llevar a cabo el monitoreo de la referencia, la metodología y tecnología usada respecto a la instrumentación presentada en esta investigación, es la siguiente (Preston, C. J. 2005):

4.3.1.1.1 Detección de oxígeno (O)

4.3.1.1.1.1 Lámpara de carburo y técnica del fósforo

Cuando el porcentaje de oxígeno en el aire baja del 12% la llama de una lámpara de carburo se extingue. La llama de un fósforo o de una vela se apaga cuando el contenido de oxígeno baja del 16%. Para probar la deficiencia de oxígeno con una llama debe asegurarse primero que no esté presente ningún gas explosivo.



Figura N° 4.1. Lámpara de Carburo y técnica del fósforo para detectar la falta de oxígeno en una mina subterránea.

Fuente: Operación de Voladura Subterránea.

4.3.1.1.2 Indicador Fyrite de oxígeno

Uno de los instrumentos más prácticos para determinar oxígeno es el indicador “Fyrite” de oxígeno. Este equipo consta de las siguientes partes.

1. Cuerpo del equipo
2. Válvula de embolo buzo de entrada
3. Escala
4. Líquido absorbente
5. Manguera de jebes
6. Bombilla de aspiración
7. Filtro
8. Tubo de muestreo



Figura N° 4.2. Equipo Fyrite.

Fuente: Fyrite Tech 2009

4.3.1.1.1.3 Operación del equipo

Para evitar errores en la determinación de oxígeno, este instrumento debe ser usado a la temperatura ambiental esperando unos minutos antes de efectuar la primera lectura. Las siguientes instrucciones deben seguirse para efectuar una determinación:

- a) Ajuste a cero, invertir el aparato a fin de que todo el líquido fluya a la cavidad superior. Regresar a la posición normal, inclinando más o menos 45° a fin de facilitar el retorno del líquido a la cavidad inferior. Presionar suavemente el embolo buzo (2) con un dedo hasta colocar el aparato en posición vertical, entonces quita el dedo. Si el menisco del líquido no está exactamente a nivel con la línea cero, aflojar el tornillo (9) y colocarlo en dicha línea.
- b) Sacar el filtro (7) y humectar con agua, ajustando luego las conexiones.
- c) Colocar el tubo de muestreo al lugar donde se va a tomar la muestra.
- d) Colocar el casquillo del tubo de jebe (5) a la válvula de embolo buzo de entrada, presionando hacia abajo hasta el límite, siempre sosteniendo el instrumento vertical con el casquillo de la manguera ajustada.
- e) Con el casquillo de la manguera firmemente presionado, comprimir y soltar la bombilla del aspirador 18 veces en rápida sucesión.
Antes de aflojar la bombilla en la última compresión quitar el casquillo de la manguera permitiendo a la válvula de embolo buzo regresar a su posición original, entonces la muestra queda encerrado dentro del instrumento.

- f) Invertir el instrumento hasta que todo el líquido fluya hacia abajo, volver a invertir para que regrese el líquido. Para asegurar una completa absorción, realizar esta operación por lo menos 4 veces. Inclinar más o menos 45° por 5 segundos para escurrir el exceso del líquido de las paredes.

4.3.1.1.1.4 Precauciones generales

Después de 50 a 75 pruebas, el líquido absorbente debe ser reemplazado. El color de la solución no es una indicación de que su propiedad absorbente se haya agotado. La solución que se sospeche agotada puede ser probada como sigue:

Después de tomar una muestra leer el porcentaje, invertir el aparato nuevamente, si la lectura nueva es más alta, la solución debe ser cambiada.

Puede ocurrir pérdida de líquido por evaporación, motivo por el cual la altura del líquido no alcanza al acero de la escala. Una pequeña cantidad de agua destilada se debe agregar a través de la válvula de entrada, la adición de agua no afecta la precisión del instrumento.

Después de cada lectura, el acero debe ser ajustado en la escala. Debe tener cuidado de no invertir el aparato con la válvula de embolo buzo presionada, pues el líquido se escapa. La solución es dañina a la piel y la ropa. Cuando sea necesario, el instrumento debe ser limpiado con agua tibia jabonosa, ninguna otra solución de limpieza debe ser usada.

4.3.1.1.2 Detección de monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono, a causa de su alta propiedad de difusión se mezcla fácilmente con el aire, y no presenta una separación apreciable como sucede con el nitrógeno y el anhídrido carbónico.

Los efectos tóxicos del monóxido de carbono (CO) son mucho más notables en algunas aves o animales pequeños como canarios y ratones; por lo que anteriormente eran usados como detectores para este tipo de gas. Actualmente se disponen de detectores químicos y eléctricos para obtener análisis directos del aire.

4.3.1.1.2.1 Monitor digital Gas Alert QUATTRO para CO, NO, NO₂ , H₂ S, O₂ y LEL, etc.

Este equipo detecta concentraciones de gases en el aire de 0 a 1000 ppm, cuya lectura se efectúa directamente en una pantalla digital. Este equipo está calibrado, de tal forma que emite alarmas sonoras y visuales cuando las concentraciones sobrepasan al límite permisible.

Para el encendido y monitoreo de gases basta con presionar un botón. Para la lectura de los registros en la oscuridad, el instrumento dispone de un pulsador ubicado en su costado derecho. Otra de las conveniencias de su utilización es que este equipo utiliza baterías alcalinas que se encuentran fácilmente en el mercado.



Gas	Rango de medición (ppm)
H ₂ S	0-100
H ₂ S (Alto rango)	0-500
SO ₂	0-100.0
H ₂ CN	0-30.0
CO	0-1000
CO (H ₂ bajo)	0-1000
NH ₃	0-100
NH ₃ (Alto rango)	0-400
Cl ₂	0-50.0
NO	0-250
NO ₂	0-100
PH ₃	0-5.0
ETO	0-100.0
ClO ₂	0-1.0
O ₃	0-1.0
O ₂ (% por vol.)	0-30.0%

Especificaciones del sensor	
Gas	Intervalo de medición
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	0-200 ppm
Monóxido de carbono (CO)	0-1000 ppm
Oxígeno (O ₂)	0-30,0%
Gases combustibles (%LEL):	0-100% LEL 0-5,0% v/v

Figura N° 4.3. Monitor digital Multigas QUATTRO

Fuente: GasAlert Quattro Operator's Manual 2013.

4.3.1.1.3 Detección de anhídrido carbónico (CO₂)

El anhídrido carbónico no mantiene la combustión y por lo tanto extingue sus llamas. Entonces, la llama de una vela o un fósforo son medidas excelentes para detectar la presencia de este gas.

El anhídrido carbónico es más pesado que el aire, y será hallado cerca al piso.

4.3.1.1.3.1 Indicador Fyrite de anhídrido carbónico

Este equipo es similar en construcción al Indicador Fyrite de Oxígeno descrito anteriormente. La operación de este equipo también es similar al indicador de oxígeno, excepto en dos aspectos.

- No hay necesidad de humectar el filtro y,
- Solo es necesario invertir el equipo dos veces (en lugar de 4 veces como el indicador de oxígeno), pues la absorción de CO_2 es mucho más rápido.

La solución del indicador del CO_2 normalmente se utiliza para varios cientos de determinaciones, la decoloración no es una indicación de que el líquido haya perdido sus cualidades absorbentes, pero si el líquido presenta espuma persistente, que dificulta la lectura debe ser renovado.

Un método fácil para determinar si el líquido ha perdido su fuerza, es analizar una muestra y entonces chequearla nuevamente sin presionar la bombilla y la válvula de embolo buzo. Si la nueva lectura es más alta que la anterior, la solución debe ser cambiada. Esta solución es también dañina para la piel o la ropa.

4.3.1.1.3.2 Tratamiento en caso de intoxicación

- ✓ El paciente debe ser sacado al aire fresco lo más pronto posible.
- ✓ Si la respiración está suspendida o es intermitente se debe dar respiración artificial.
- ✓ Conservar al paciente abrigado todo el tiempo, inclusive se tiene que tratar por shock.

Los pacientes que se recuperan a tiempo de la sofocación por gases tóxicos como los mencionados, generalmente no tiene otro efecto posterior que un fuerte dolor de cabeza y/o nauseas.



Figura N° 4.4. Presencia de gases en una mina subterránea y la forma como auxiliar a la persona gaseada.

Fuente: Operación de Voladura Subterránea.

4.3.2. Procedimientos

Para esta etapa del trabajo de investigación en la que se presenta el modelo matemático de optimización de agentes de voladura, se ha utilizado el software Microsoft Excel, que mediante algoritmos sencillos nos brindan resultados precisos, válidos y necesarios para probar la hipótesis planteada.

4.3.2.1 Optimización de agentes de voladura

Como se sabe para que todos y cada uno de los agentes de voladura sean óptimos, deben cumplir con las siguientes condiciones técnicas-económicas-ambientales (Chaver, W et al. 2007):

- Tener un balance de oxígeno que tienda a cero ($O_B \approx 0$)
- Producir un calor de explosión máximo (Q_3 Kcal/Kg)
- Generación mínima de gases tóxicos
- Tener un costo mínimo (US\$/Kg)

4.3.2.1.1 Balance de oxígeno ($O_B \approx 0$)

La mayoría de las MEC son formuladas para tener aproximadamente un balance de oxígeno $O_B \approx 0$, esto es que los elementos constituyentes principales tales como:

H, N, O y C en la MEC deben estar en la proporción de tal manera que en los gases resultantes de la detonación todo el O_2 reacciona para formar H_2O , el N combinado reacciona para formar nitrógeno molecular N_2 y el carbón reacciona para formar CO_2 . Si hubiera suficiente oxígeno O_2 presente en la MEC para formar H_2O y CO_2 , entonces se dice que la MEC esta balanceada en oxígeno.

Cuando una MEC balanceada no contiene otros elementos con afinidad por oxígeno el balance de oxígeno = 0 puede ser expresado matemáticamente como sigue:

$$O_B = O_0 - 2CO_2 - H_2O = 0 \rightarrow (1)$$

En la ecuación anterior O_0 es el número de átomos gramos de estos elementos (normalmente 100g) de MEC, y el H_2O y CO_2 son moles producidos por unidad de peso de la MEC.

Se debe expresar que en una forma más general para cualquier MEC conteniendo C, H, N y O, la ecuación (1) puede ser expresada de la siguiente manera:

$$O_B = O_0 - 2C_0 - \frac{1}{2}H_0 \rightarrow (2)$$

Dónde:

O_0 , C_0 y H_0 representan el número de átomos gramos de estos elementos por peso unitario de la MEC. O_0 es corregido con la cantidad combinada con elementos para formar productos sólidos, tales como: CaO y Na_2O , cuando tales elementos están presentes.

$$O_B = O_0 - 2C_0 - \frac{1}{2}H_0 - \frac{3}{2}Al \rightarrow (3)$$

Si hubiera una deficiencia se dice que el OB es negativo y si hubiera un exceso se dice que el OB es positivo.

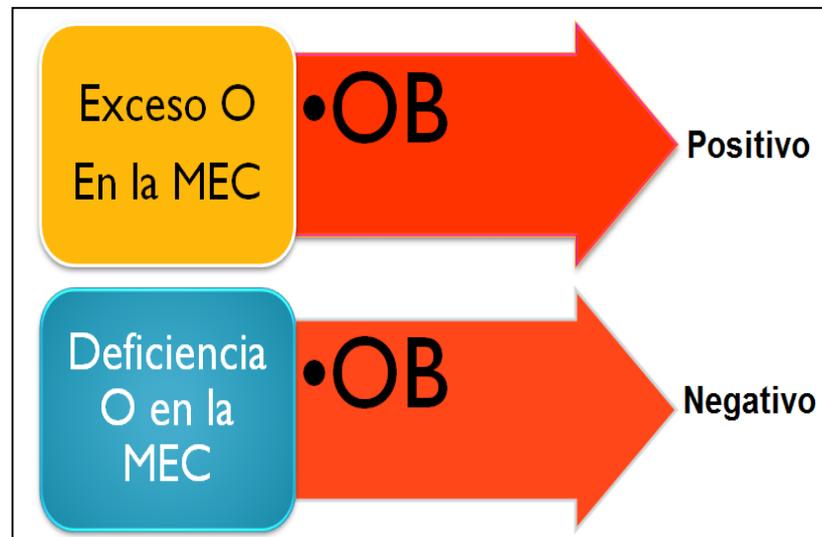


Figura N° 4.5. Presencia de oxígeno en la MEC.

Fuente: Elaborado por el investigador.

4.3.2.1.2 Calor de explosión ($Q_3 \approx \text{máximo}$)

La energía producida por la detonación de cualquier agente de voladura puede ser calculada usando la siguiente expresión matemática:

$$Q_3 = H_P - H_R \rightarrow (4)$$

Dónde:

Q_3 = Calor de explosión en Kcal/Kg.

H_P = Calor de formación de los productos

H_R = Calor de formación de los reactantes.

4.3.2.1.3 Costo mínimo (US\$/Kg \approx mínimo)

Si la formulación de agentes de voladura es la correcta, quiere decir, si los ingredientes están en la proporción

correcta y todos los ingredientes usados en la formulación cumplen con las especificaciones técnicas requeridas; entonces se obtendrá un costo (US\$/Kg) de agente de voladura mínimo.

4.3.2.1.4 Generación de gases nocivos (fumes \approx mínimo)

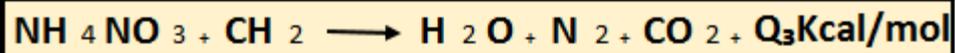
La adecuada formulación de cualquier agente de voladura incluyendo los controles de calidad que deben tener sus ingredientes no debe generar gases tóxicos en el momento de la detonación.

4.3.3 Determinación del balance de oxígeno y calor de explosión de los agentes de voladura

4.3.3.1 Agente de voladura AN/FO: $\text{NO}_3\text{NH}_4 + \text{CH}_2$

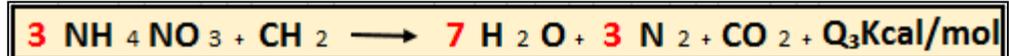
Paso 1: Balancear la ecuación.

Tabla N° 4.1. Ecuación del ANFO y sus productos.



Fuente: Elaborado por el investigador.

Tabla N° 4.2. Ecuación balanceada del ANFO



Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 2: Calculo del peso molecular de los ingredientes del AN/FO

Tabla N° 4.3. Peso molecular de los ingredientes del AN/FO

PA		PESO MOLECULAR					
N	14.0067	INGREDIENTES	SIMBOLOS				TOTAL PM
O	15.9994		N	O	H	C	
H	1.0079	AN (NO ₃ NH ₄)	28.013	47.998	4.032		80.043
C	12.0107	FO (CH ₂)			2.016	12.011	14.027

Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 3: Calculo del porcentaje de los ingredientes del AN/FO: De la ecuación balanceada se tiene:

Tabla N° 4.4. Porcentaje de los ingredientes del AN/FO

Ingrediente	PM	Coficiente	Producto	%
AN (NO ₃ NH ₄)	80.0432	3	240.1296	94.4811476
FO (CH ₂)	14.0265	1	14.0265	5.51885239
Σ			254.1561	100

Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 4: Calculo de los átomos-gramos de los ingredientes del AN/FO

AN: NO₃NH₄

Tabla N° 4.5. Átomos-gramos de los ingredientes del AN.

$N_o = 94.5 \text{ grAN} * \frac{1 \text{ molAN}}{80 \text{ grAN}} * \frac{2 \text{ atN}}{1 \text{ molAN}} = 2.36075$
$H_o = 94.5 \text{ grAN} * \frac{1 \text{ molAN}}{80 \text{ grAN}} * \frac{4 \text{ atH}}{1 \text{ molAN}} = 4.72151$
$O_o = 94.5 \text{ grAN} * \frac{1 \text{ molAN}}{80 \text{ grAN}} * \frac{3 \text{ atO}}{1 \text{ molAN}} = 3.54113$

Fuente: Elaborado por el investigador.

FO: CH₂

Tabla N° 4.6. Átomos-gramos de los ingredientes del FO.

$C_o = 5.52 \text{ grFO} * \frac{1 \text{ molFO}}{14 \text{ grFO}} * \frac{1 \text{ atC}}{1 \text{ molFO}} = 0.39346$
$H_o = 5.52 \text{ grFO} * \frac{1 \text{ molFO}}{14 \text{ grFO}} * \frac{2 \text{ atH}}{1 \text{ molFO}} = 0.78692$

Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 5: Confeccionar tabla de los átomos-gramos ingredientes del AN/FO

Tabla N° 4.7. Átomos-gramos del AN/FO

Ingredientes	PM	%	H ₀	O ₀	C ₀	N ₀
NO ₃ NH ₄	80.0432	94.4811476	4.72150777	3.54113082		2.36075388
CH ₂	14.0265	5.51885239	0.78691796		0.39345898	
Atm-Gr/100gr MEC (Σ*10)		100	5.50842573	3.54113082	0.39345898	2.36075388
At-Gr/Kg			55.0842573	35.4113082	3.93458981	23.6075388

Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 6: Calculo del balance de oxigeno (O_B) del AN/FO.

Tabla N° 4.8. Balance de oxigeno (O_B) del AN/FO

$O_B = O_0 - 2C_0 - \frac{1}{2}H_0$	
$O_B = 35.41131 - 2 (3.93459) - \frac{1}{2} (55.08426)$	
$O_B \approx 0.0000 \quad \text{At-gr/Kg}$	
$O_B \approx 0$	

Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 7: Calculo del calor de explosión del AN/FO (Q_3

Kcal/mol): Los calores de formación de los reactantes y los productos de cualquier mezcla explosiva comercial han sido determinados por los investigadores e inventores de las mezclas explosivas comerciales, y se encuentran tabulados en tablas, pero estos datos se usan conjuntamente con la ecuación balanceada de este agente de voladura.

Tabla N° 4.9. Calor de explosión del AN/FO

HR				HP			
NO ₃ NH ₄	3	87	261.00	H ₂ O	7	57.8	404.60
CH ₂	1	7	7.00	CO ₂	1	94.1	94.10
Σ			268.00	N ₂	3	0	0.00
				Σ			498.70

Fuente: Elaborado por el investigador.

Tabla N° 4.10. Calor de explosión del AN/FO (Kcal/mol)

$Q_3 = Q_P - Q_R$		
$Q_3 =$	498.70	268.00
$Q_3 =$	230.70 Kcal/mol	

Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 8: Conversión de Kcal/mol a Kcal/Kg.

Tabla N° 4.11. Conversión de Gr/mol a Kg/mol

Conversión de Gr/mol a Kg/mol		
NO ₃ NH ₄	80.0432	3
CH ₂	14.0265	1
Σ PM AN/FO (Gr/mol)		254.16
1Kg =	1000 gr	0.254 Kg/mol

Fuente: Elaborado por el investigador.

Tabla N° 4.12. Conversión de Kcal/mol a Kcal/Kg

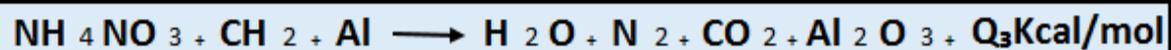
$Q_3 =$	$\frac{230.70 \text{ Kcal/mol}}{0.254 \text{ Kg/mol}}$
$Q_3 =$	907.71 Kcal/Kg

Fuente: Elaborado por el investigador.

4.3.3.2 Agente de voladura AL/AN/FO: NO₃NH₄ + CH₂ + Al

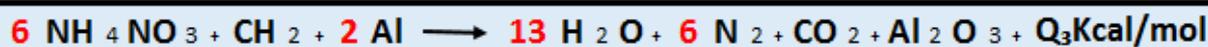
Paso 1: Balancear la ecuación.

Tabla N° 4.13. Ecuación del ALANFO y sus productos



Fuente: Elaborado por el investigador.

Tabla N° 4.14. Ecuación balanceada del ALANFO



Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 2: Calculo del peso molecular de los ingredientes del AL/AN/FO

Tabla N° 4.15. Peso molecular de los ingredientes del AL/AN/FO

PA		PESO MOLECULAR						
N	14.0067	INGREDIENTES	SIMBOLOS					TOTAL PM
			N	O	H	C	Al	
O	15.9994							
H	1.0079	AN (NO ₃ NH ₄)	28.013	47.998	4.032			80.043
C	12.0107	FO (CH ₂)			2.016	12.011		14.027
Al	26.9815	Al (Al)					26.98154	26.982

Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 3: Calculo del porcentaje de los ingredientes del AL/AN/FO: De la ecuación balanceada se tiene:

Tabla N° 4.16. Porcentaje de los ingredientes del AL/AN/FO

Ingrediente	PM	Coficiente	Producto	%
AN (NO ₃ NH ₄)	80.04	6	480.26	87.60
FO (CH ₂)	14.03	1	14.03	2.56
Al	26.98	2	53.96	9.84
	Σ		548.25	100

Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 4: Calculo de los átomos-gramos de los ingredientes del AL/AN/FO

AN: NO_3NH_4

Tabla N° 4.17. Átomos-gramos de los ingredientes del AN.

$\text{N}_o = 87.6 \text{ grAN} * \frac{1 \text{ molAN}}{80 \text{ grAN}} * \frac{2 \text{ atN}}{1 \text{ molAN}} = 2.18879$
$\text{H}_o = 87.6 \text{ grAN} * \frac{1 \text{ molAN}}{80 \text{ grAN}} * \frac{4 \text{ atH}}{1 \text{ molAN}} = 4.37757$
$\text{O}_o = 87.6 \text{ grAN} * \frac{1 \text{ molAN}}{80 \text{ grAN}} * \frac{3 \text{ atO}}{1 \text{ molAN}} = 3.28318$

Fuente: Elaborado por el investigador.

FO: CH_2

Tabla N° 4.18. Átomos-gramos de los ingredientes del FO.

$\text{C}_o = 2.56 \text{ grFO} * \frac{1 \text{ molFO}}{14 \text{ grFO}} * \frac{1 \text{ atC}}{1 \text{ molFO}} = 0.1824$
$\text{H}_o = 2.56 \text{ grFO} * \frac{1 \text{ molFO}}{14 \text{ grFO}} * \frac{2 \text{ atH}}{1 \text{ molFO}} = 0.3648$

Fuente: Elaborado por el investigador.

Al: Al

Tabla N° 4.19. Átomos-gramos de los ingredientes del Al.

$$\text{Al} = 9.84 \text{ grFO} * \frac{1 \text{ molAl}}{27 \text{ grAl}} * \frac{1 \text{ atAl}}{1 \text{ molAl}} = 0.3648$$

Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 5: Confeccionar tabla de los átomos-gramos ingredientes del AL/AN/FO

Tabla N° 4.20. Átomos-gramos del AL/AN/FO

Ingredientes	PM	%	H _o	O _o	C _o	N _o	Al _o
NO ₃ NH ₄	80.04	87.5987722	4.37757472	3.28318104		2.18878736	
CH ₂	14.03	2.55841883	0.36479789		0.18239895		
Al	26.98	9.84					
Atm-Gr/100gr MEC (Σ*10)		100	4.74237261	3.28318104	0.18239895	2.18878736	0.36479789
At-Gr/Kg			47.4237261	32.8318104	1.82398947	21.8878736	3.64797893

Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 6: Calculo del Balance de Oxigeno (O_B) del AL/AN/FO.

Tabla N° 4.21. Balance de oxigeno (O_B) del AL/AN/FO

$O_B = O_0 - 2C_0 - \frac{1}{2}H_0 - \frac{3}{2}Al$
$O_B = 32.83181 - 2 (1.82399) - \frac{1}{2} (47.42373) - \frac{3}{2} (3.64798)$
$O_B \approx 0.0000 \quad \text{At-gr/Kg}$
$O_B \approx 0$

Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 7: Calculo del calor de explosión del AL/AN/FO (Q_3

Kcal/mol): Los calores de formación de los reactantes y los productos de cualquier mezcla explosiva comercial han sido determinados por los investigadores e inventores de las mezclas explosivas comerciales, y se encuentran tabulados en tablas, pero estos datos se usan conjuntamente con la ecuación balanceada de este agente de voladura.

Tabla N° 4.22. Calor de explosión del AL/AN/FO

HR				HP			
NO ₃ NH ₄	6	87	522.00	H ₂ O	13	57.8	751.40
CH ₂	1	7	7.00	CO ₂	1	94.1	94.10
Al	2	0	0.00	N ₂	6	0	0.00
Σ			529.00	Al ₂ O ₃	1	392	392.00
				Σ			1237.50

Fuente: Elaborado por el investigador.

Tabla N° 4.23. Calor de explosión del AL/AN/FO (Kcal/mol)

$Q_3 = Q_P - Q_R$		
$Q_3 =$	1237.50	529.00
$Q_3 =$	708.50 Kcal/mol	

Fuente: Elaborado por el investigador.

Paso 8: Conversión de Kcal/mol a Kcal/Kg.

Tabla N° 4.24. Conversión de Gr/mol a Kg/mol

Conversión de Gr/mol a Kg/mol			
NO ₃ NH ₄	80.0432	6	480.26
CH ₂	14.0265	1	14.03
Al ₂ O ₃	26.9815	2	53.96
Σ PM AN/FO (Gr/mol)			548.25
1Kg =	1000 gr		0.548 Kg/mol

Fuente: Elaborado por el investigador.

Tabla N° 4.25. Conversión de Kcal/mol a Kcal/Kg

$Q_3 =$	$\frac{708.50 \text{ Kcal/mol}}{0.548 \text{ Kg/mol}}$
$Q_3 =$	1292.30 Kcal/Kg

Fuente: Elaborado por el investigador.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1 Gases producidos según el porcentaje de Diesel.

En el gráfico se muestran los problemas respecto al exceso o deficiencia de Diesel N°2 (FO); esto se ve reflejado en la generación de gases tóxicos como son el monóxido de carbono si hay exceso de FO, y los gases nitrosos si hay deficiencia, y que afectan notoriamente el resultado de una voladura en temas de eficacia y eficiencia, según el balance de oxígeno sea positivo o negativo. Pero al optimizar los agentes de voladura determinando las proporciones adecuadas tanto de AN (94.48 %) y FO (5.51 %), el balance de oxígeno es tendiente a cero (0) produciendo una reacción ideal para la formación de productos deseados como son el H₂O, CO₂ y N₂.

- ✓ La coloración de gases rojizos, amarillos o café ocre; evidencian la presencia de gases nitrosos, y la coloración de gases gris oscuro o carbón en las paredes de los taladros, evidencian la presencia de monóxido de carbono.

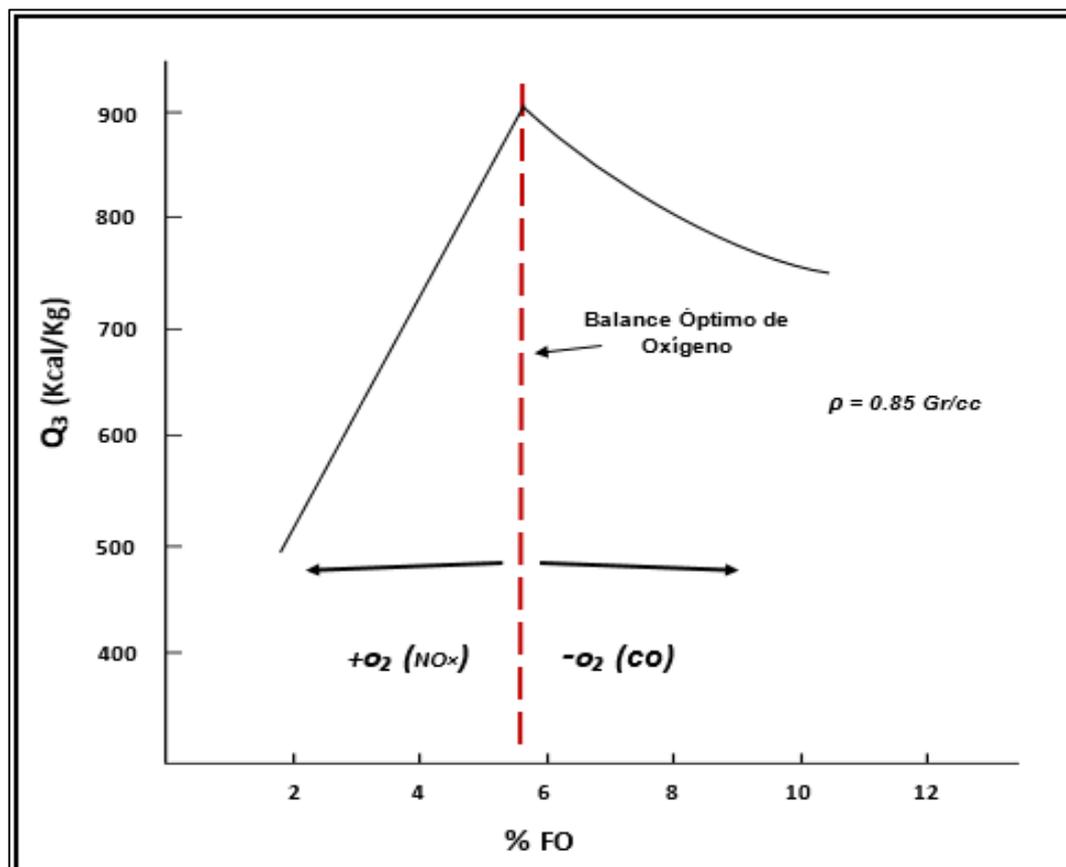


Grafico N° 5.1. Gases Produced Vs. Percentage of Fuel Oil (FO)

Fuente: Porter, P . ISEE - USA, 2007.

5.2 Calor de explosión máximo liberado en un balance óptimo del ANFO

En el gráfico se observa el punto más elevado en liberación de energía, que calculado con el modelo matemático teniendo el porcentaje óptimo de FO, se obtuvo alrededor de los 907 Kcal/Kg para el ANFO. Este dato es casi inalterable en el punto óptimo de la formulación del ANFO; sin embargo, el exceso o deficiencia de FO ocasiona la disminución inmediata de energía, ya que la formación de los gases tóxicos no deseados absorbe energía y disminuye la temperatura en la reacción, por lo tanto la energía liberada disminuye y resulta en una mala fragmentación.

Por lo tanto, al controlar y mitigar los gases tóxicos optimizando agentes de voladura, también se logra la máxima liberación de energía que se requiere para fracturar la roca.

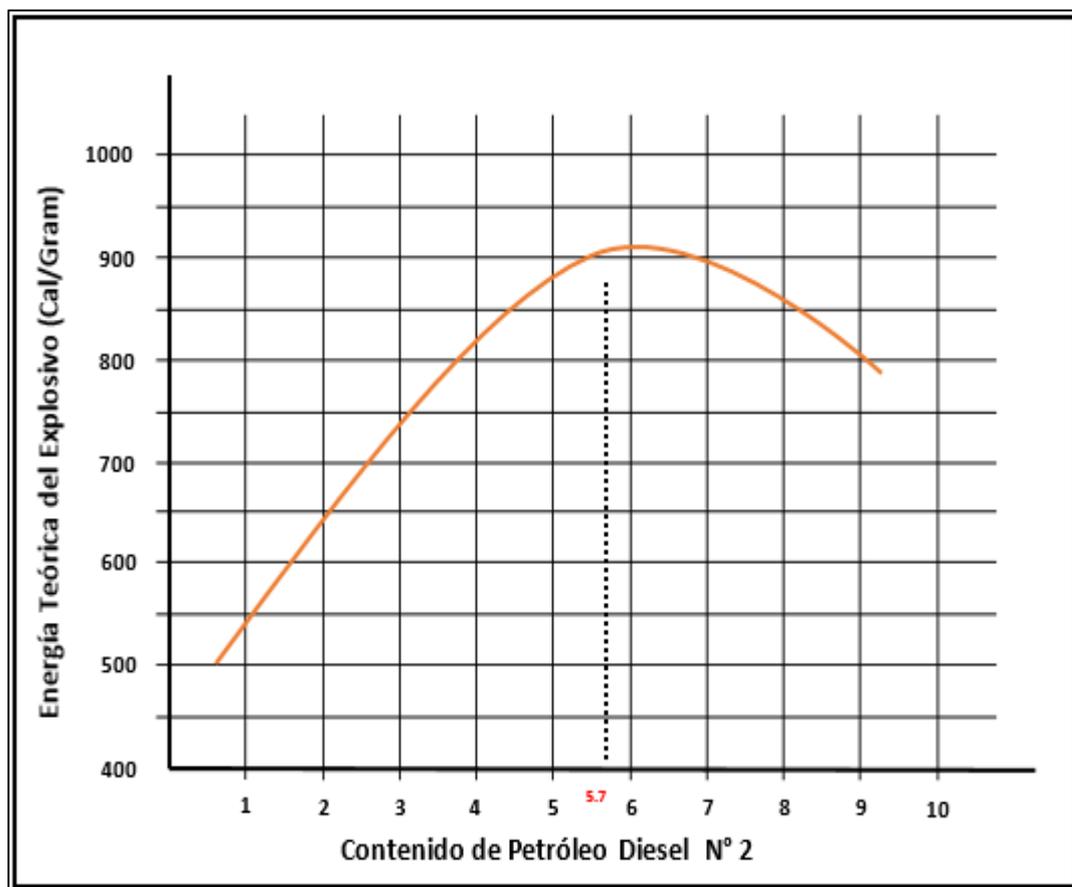


Gráfico N° 5.2. Efectos del contenido de Diésel en la energía liberada por el explosivo.

Fuente: Chaver, W. 2007

5.3 Incremento de energía liberada al agregar aluminio al ANFO

En el presente gráfico se observa cómo la adición de aluminio puede incrementar la energía liberada en un agente de voladura común como es el ANFO; y ésta debe ser debidamente calculada; tal es así, que para la presente investigación se usó el aluminio, y como se demostró en los cálculos realizados, la energía liberada aumenta alrededor del 35%, la razón por la que se usa, es que durante la reacción, el metal en polvo genera calor y eleva la temperatura de la reacción generando una presión de explosión mayor.

- ✓ Otros elementos usados para mejorar la eficiencia de los agentes de voladura, es el azufre, que al combinarlo con el ANFO forma SANFO, y el carbón, que suplantando al FO en el ANFO, forma el ANCO. Estas mezclas explosivas, también pueden ser optimizadas con el modelo matemático presentado.

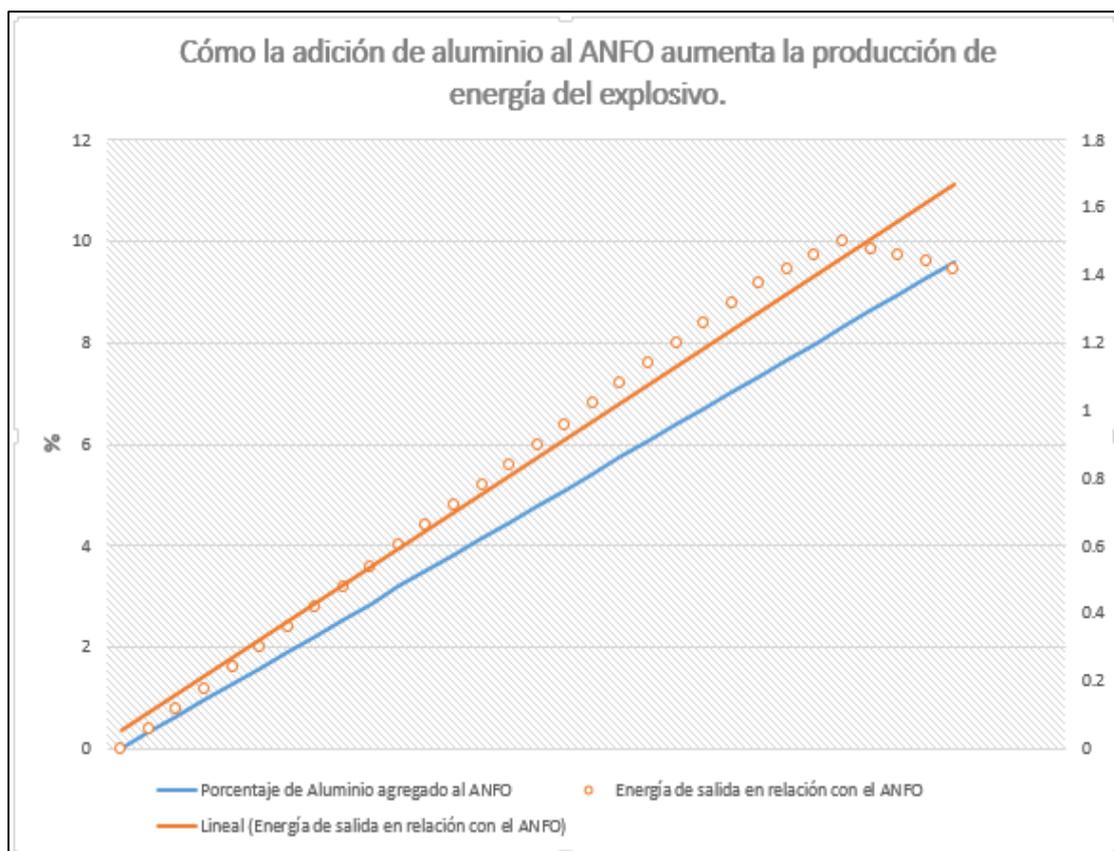


Grafico N° 5.3. Incremento de energía liberada al agregar aluminio en el ANFO y formar ALANFO.

Fuente: Thron Ley, G. M and Fuk, A, G. IRECO chemicals, 1998.

5.4 Curvas límite en velocidad de detonación para el ANFO

El gráfico muestra cómo influye el porcentaje de FO en la velocidad de detonación del ANFO, ésta característica técnica puede ser usada como herramienta para determinar si el explosivo es o no eficiente, o si concuerda con las especificaciones técnicas de dicho producto. Como se puede observar, el alterar las proporciones de la mezcla explosiva no incrementa la velocidad de detonación, sino que sucede lo contrario y disminuye; este gráfico también nos muestra que un agente de voladura óptimo en las proporciones de sus componentes, es determinante en el desempeño del mismo, y en la eficacia y eficiencia de la operación unitaria de voladura de rocas.

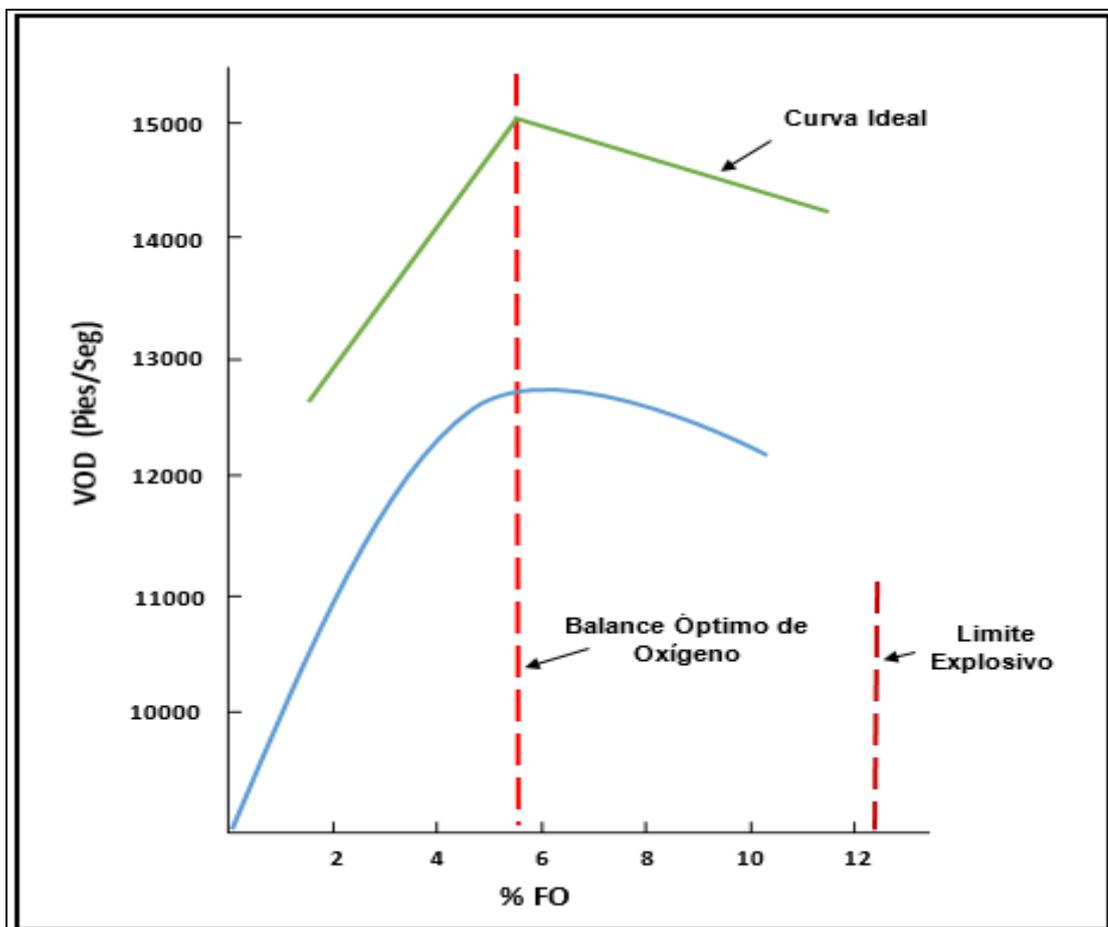


Gráfico N° 5.4. Velocity of Detonations Vs. Percentage of F.O in AN/FO

Fuente: Porter, P . ISEE - USA, 2007.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

Siendo la optimización de los agentes de voladura la base para el control y/o mitigación de los gases tóxicos producidos al ser detonados la finalidad del presente trabajo de investigación, luego de realizados los cálculos mediante el modelo matemático presentado, se puede aseverar que:

- ✓ El control y mitigación de gases tóxicos no deseados en la operación unitaria de voladura de rocas, es logrado al formular un agente de voladura óptimo cuyo balance de oxígeno calculado sea tendiente cero ($B_o \approx 0$), esto quiere decir, que no falta ni sobra oxígeno en la reacción, y al reaccionar el C, H, O y N; generan los productos deseados como son el CO_2 , H_2O y N_2 . Por el contrario, si se formula de manera deficiente estos agentes de voladura, se dan los dos casos que producen problemas en la operación; como son, el balance de oxígeno positivo cuando se agrega poco combustible a la mezcla y por lo tanto sobraré oxígeno que al combinarse con el nitrógeno genera los óxidos de nitrógeno; y el balance de oxígeno negativo en el que ocurre lo contrario y se da al agregar diesel en exceso, lo que deja carbonos libres al no haber suficiente oxígeno, y se forma el monóxido de carbono.

- ✓ Asimismo y controlando la emisión de gases tóxicos al haber formulado un agente de voladura óptimo, se logrará obtener el máximo nivel en calor de explosión ($Q_3 \approx \text{máximo}$), alrededor de los 907 Kcal/Kg para el ANFO, y 1292 Kcal/Kg para el ALANFO de energía liberada; lo que dará como resultado una adecuada fragmentación que mantenga los costos operacionales dentro de lo planificado.

CONCLUSIONES

- ✓ Al aplicar el modelo matemático para optimizar los agentes de voladura sujeto de esta investigación, se van obteniendo diversos resultados con cada paso, iniciando con la determinación de los productos gaseosos deseados al balancear la ecuación, resultando así como productos ideales el H_2O , el N_2 y el CO_2 ; siendo lo óptimo para la eficiencia del agente de voladura. Esto va ligado directamente con el balance de oxígeno (O_B), que continuando con el modelo matemático los resultados ideales obtenidos son tendientes a cero (0), quiere decir que no faltarán ni sobrarán átomos de oxígeno en la reacción y por lo tanto se formarán los gases deseados como producto. Por lo tanto, el valor del modelo matemático descrito es muy elevado en tema de optimización de agentes de voladura, y se ha logrado el objetivo general de esta investigación de controlar y/o mitigar los gases tóxicos no deseados como son el monóxido de carbono(CO), y los óxidos nitrosos (NO_x) descritos en el marco teórico. *El modelo matemático presentado, puede aplicarse también para optimizar otras combinaciones explosivas, como por ejemplo agregando Carbón (C) y Azufre (S).*
- ✓ Los diferentes gases producidos al detonar agentes de voladura son necesarios para fracturar la roca; los distintos gases tóxicos generados al detonar una deficiente mezcla explosiva ocasionan diferentes síntomas y la muerte si son inhalados. Por otro lado, al generarse gases tóxicos no deseados la energía liberada en el disparo disminuye con respecto a presión de detonación y presión de explosión, lo cual genera una deficiente fragmentación de roca y problemas en las operaciones mineras subsiguientes.
- ✓ Cada agente de voladura tiene diferentes características con respecto a su desempeño y el ambiente donde se usarán, esto hace posible o no su uso bajo ciertas condiciones. Asimismo los accesorios de voladura también tienen sus ventajas y desventajas, y están limitados a la mecanización, tecnología y costos operacionales de la mina. Los criterios de selección de ambos, son discutidos en los estudios iniciales de cada proyecto minero y van variando según el avance de la explotación debido a la naturaleza cambiante de la corteza terrestre.

- ✓ El monitoreo de gases tóxicos puede ser con respecto a sus concentraciones en ambientes confinados, y de modo visual mediante videos e imágenes. Al monitorear áreas o zonas de posible acumulación, se podrá evitar incidentes o accidentes. Al monitorear de manera visual, podemos identificar las diferentes coloraciones en los gases que indican como ha sido formulado dicho agente y cuál podría ser su error, por lo tanto, se pueden tomar las medidas correctivas para controlar dichas emanaciones no deseadas y perjudiciales para el personal, ambiente circundante y costos del proyecto.

RECOMENDACIONES

- ✓ Los agentes de voladura, se fabrican para usarlos bajo ciertas condiciones que permitan su eficacia y eficiencia; sumado a esto y para lograr el control y/o mitigación de los gases tóxicos producidos al detonarlos , se recomienda optimizarlos y contar con estas características:
 - Balance de oxígeno tendiente a cero ($O_B \approx 0$)
 - Calor de explosión Q^3 (Kcal/Kg) = Máximo

- ✓ Se recomienda que en toda operación minera subterránea, que es donde el riesgo de intoxicación por gases es alto, se debe contar con equipos adecuados para detectar, monitorear y evaluar los gases tóxicos; y así tomar las medidas correctivas y de prevención de accidentes. Asimismo, se debe mantener una buena ventilación en zonas de disparos y tomar el tiempo pertinente para la disipación de los gases que permita contar con un mínimo de 19.5% de oxígeno en el ambiente de trabajo, también se debe calcular los metros cúbicos por minuto necesarios para el personal y equipos de acuerdo a la altitud del proyecto, y una velocidad de aire no menor a 25m/min (Artículos plasmados en el DECRETO SUPREMO N° 055-2010-EM).

- ✓ En la selección del explosivo que se usará en un proyecto se deberá discutir dos aspectos importantes y principales; primero, que el explosivo funcione de manera segura y confiable bajo las condiciones en las que se usará, y segundo, que el explosivo sea el más económico y produzca los resultados deseados para el proyecto. Por lo tanto, antes de llevar a cabo toda operación unitaria de voladura de rocas, se debe conocer todo lo relacionado a las características geológicas de la zona, y geomecánicas de la roca; que son datos fundamentales requeridos, y conociendo estas variables no controlables, se estará en condiciones de:
 - Diseñar mallas adecuadas de perforación y voladura, y
 - Seleccionar el agente de voladura y accesorios adecuados para el proyecto (que será variable según cambie la zona de explotación)
 - Finalmente, esta operación se la debe desarrollar siguiendo los procedimientos y prácticas de seguridad propios de cada empresa.

REFERENCIAS

A Dick, R, et al. (2000). Explosives and blasting procedures manual, USBM.

A. A. Balkema. (1999). Blasting Principles for Open Pit Mininn. Hustruid, W.

Brown, T. E. et al. (2008). Environmental concerns of the blasting industry, explosives technologies international group.

Brulia, J. C (1981) Technical information on sequential blasting and the use of R.E.O sequential blasting equipment. Tamaqua, PA. Field technical operations, Atlas Powder Company.

Chaver, W et al. (2007). Efectos de las variaciones del balance de oxígeno (OB) y de la granulometría en las propiedades de los agentes de voladura.

Chiappeta, R . F, Bauer, A. & Burchell, S. L (1983). The use of high speed motion picture photography in blast evaluation and design. Proceedings of the 9th annual conference on explosives and blasting techniques society of explosives engineers, pp 258-309.

Curso básico de explosivos. ORICA (2005, 1 de Agosto).

Davis, W. C (1983). High explosives. Los Alamos science, pp.48-52.

Dr. Calvin J. Konya, Ing. Enrique Albarrán N. (Ed.) (1998). Diseño de Voladuras, pp 23-37.

DynoConsult Latin America (2005). Capitulo &: Teoria de Voladura.

Ing. Aníbal Villagaray M., Operación de Voladura de Rocas. CETEMIN. Recuperado el 28 de julio de 2015, de http://es.slideshare.net/roque_21/operacion-de-voladura-subterranea-36205018

Iniciadores y Dispositivos de Retardo (s.f.). Recuperado el 17 de julio de 2015, de <http://es.slideshare.net/adrianingapauca/72419841disenodeunamalladeporacionenmineriasubterraneaaparte2>

Instituto Nacional de Seguridad e higiene en el Trabajo ESPAÑA. (s.f.). [en línea] Recuperado el 10 de agosto de 2015, de <http://www.insht.es/portal/site/Insht/>

ISEE. (2011) Blasters hand book.

Llorente, G. E. (2002). Estudio de los explosivos industriales.

Lundborg, N. (1974). The Hazard of flyrock in rock blasting, Swedish Rock Blasting Committee, Stockholm, Swenden.

Operación de Voladura Subterránea. (s.f.). Recuperado el 25 de junio de 2015, de http://es.slideshare.net/roque_21/operacion-de-voladura-subterranea-36205018

Página Web N° 1: Discovery Channel destaca megaproyecto- Perú. (s.f.). [en línea] Recuperado el 27 de enero de 2015, de <http://sindramas.com/phpBB3/viewtopic.php?f=17&t=145907>

Página Web N° 2: Nota Cultural del Día. (s.f.). [en línea] Recuperado el 12 de julio de 2015 de <http://notaculturaldeldia.blogspot.pe/2012/02/diagrama-de-fase-del-agua-hielo-agua.html>

Página Web N° 3: Crater misterioso surge al lado de mina de potasio en Rusia. Recuperado el 08 de febrero de 2015, en <http://economia.estadao.com.br/blogs/retratos-da-economia/cratera-misteriosa-surge-ao-lado-de-mina-de-potassio-na-russia/>

Per Anders Persson et al. (1993). Rock blasting and explosives engineering.

Porter, P. (2007). Ammonium nitrate blasting agents quality testing for maximum benefit, ISEE – USA.

Preston, C. J. (2005). *New methods in production blast monitoring and optimization*. Dupont, Canada, In.

Reglamentación en Manejo de Vibraciones (s.f.) [en línea] Recuperado el 05 de junio de 2015, de <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/vibraciones/reglamentacion.pdf>

Restauración y Remediación de Terreno. (s.f.). [en línea] Recuperado el 26 de agosto de 2015, de <http://www.uclm.es/users/higueras/MAM/MMAM8.htm>

Roy, P. (2011). *Rock Blasting effects and operations*. CMRI India.

Thron Ley, G. M and Fuk, A, G. (1998). *Aluminized blasting agents*, IRECO chemicals.

Van Dolah, R. W, Murphy, C. J and Hanna, N. E. (2009). *Fumes from ammonium nitrate hydrocarbon mixtures*. International symposium on mining research, USA.

Villena Alegre. C (2013). *Modelo matemático para predecir el lanzamiento de Fragmentos de roca en minería superficial* (Tesis de grado) UNI, Lima, Perú.

ANEXOS

ANEXO N° 1. Calores de formación.

Ingredients	Heat of formation (KCal/mole)
Na ₂ SO ₃	261.2
CH ₂	7.02
Al	0.00
CO	26.42
H ₂ O	57.80
CO ₂	94.05
N ₂	0.0
S	0.0
NO	21.6
Al ₂ O ₃	392
NaS	89.8
NO ₃ Na	111.75
C ₆ H ₁₀ O ₅	163.01
NaCl	97.10
C	0.00
Fe ₂ O ₃	197.33
CaCO ₃	246.6
Na ₂ SO ₄	350.50
C ₃ H ₅ N ₃ O ₉	82.66
Pb(N ₃) ₂	-107.0 to -112.0
Na ₂ O	100.0
CaO	155.0
C ₇ N ₂ O ₄ H ₆	6.9
NO ₃ NH ₄	87.2
FeO	65
Na ₂ O	100